

Titre: Performances d'un champ de puits géothermiques verticaux peu
Title: profonds en boucle fermée

Auteur: Marilyne Rancourt-Ouimet
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Rancourt-Ouimet, M. (2012). Performances d'un champ de puits géothermiques
Citation: verticaux peu profonds en boucle fermée [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/981/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/981/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Michel Bernier
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PERFORMANCES D'UN CHAMP DE Puits GÉOTHERMIQUES
VERTICAUX PEU PROFONDS EN BOUCLE FERMÉE

MARILYNE RANCOURT-OUIMET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

NOVEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

PERFORMANCES D'UN CHAMP DE Puits GÉOTHERMIQUES
VERTICAUX PEU PROFONDS EN BOUCLE FERMÉE

Présenté par : RANCOURT-OUIMET Marilyne

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KUMMERT Michaël, Ph.D., président

M. BERNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

Mme CAURET Odile, Ph.D., membre

DÉDICACE

"Go as far as you can see, get there, and see further."

Professor B.R. Baliga

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord Électricité de France (EDF), et tout particulièrement Mme Odile Cauret, de m'avoir permis de prendre part à ce projet expérimental novateur, de m'avoir chaleureusement accueillie aux Renardières pour un stage de deux semaines ainsi que pour le support technique et financier d'EDF tout au long de ce projet.

Le Smart Net-zero Energy Buildings Strategic Research Network (SNEBRN) a participé financièrement à ce projet et je les remercie.

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Michel Bernier, pour son support et ses conseils judicieux tout au long de mon travail.

Je remercie Odile Cauret d'avoir accepté d'être rapporteur de mon mémoire ainsi que Michaël Kummert d'avoir présidé mon jury.

Je remercie l'équipe technique d'EDF pour leur support en ce qui concerne la plate-forme expérimentale.

Je remercie le groupe MECBAT, notamment Katherine D'Avignon, Aurélie Verstraete, Antoine Courchesne-Tardif, Romain Jost, Mathieu Lévesque, Massimo Cimmino, Yannick Allard et Humberto Qunitana pour leur bonne humeur et dynamisme au quotidien.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont supportée et encouragée au cours de ces deux années de travail, tout particulièrement mes parents Martine et Guy, ma sœur Géraldine et mon copain Spencer.

Finalement, je remercie tous ceux qui se sont déplacés pour la présentation de mon mémoire et qui ne sont pas déjà cités ci-dessus.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une étude de la performance d'un champ de puits géothermiques de faible profondeur intégrés à une installation en climat naturel simulant un bâtiment à basse consommation énergétique et localisée au Centre de Recherche d'Électricité de France à Moret-sur-Loing. Cette étude comporte deux volets, soit la conception d'un site expérimental instrumenté permettant de collecter des données sur une saison de chauffage ainsi qu'un volet de modélisation afin d'utiliser les résultats expérimentaux pour valider un modèle de puits géothermique basé sur la méthode de la ligne source finie et développé dans l'environnement de simulation TRNSYS.

Le site expérimental est formé de 16 puits de 9 mètres de profondeur dont la tête est enfouie à 1 mètre de profondeur et positionnés en configuration carrée. La méthode de construction ainsi que les problèmes rencontrés lors de cette étape sont présentés dans cette étude.

Un test de réponse thermique est réalisé afin de déterminer les propriétés du sol. Ce test se distingue de l'approche classique, car il est effectué sur des puits de faible profondeur et, contrairement à l'approche conventionnelle d'injection de chaleur, il est réalisé en mode froid en utilisant la pompe à chaleur de l'installation. En appliquant la méthode graphique présentée dans les travaux de Gehlin (1998), une conductivité thermique du sol de 2,52 W/mK et une résistance thermique équivalente du puits de 0,198 mK/W sont obtenues.

Le modèle de puits géothermique développé dans le cadre de cette étude, le TYPE273, est basé sur le TYPE272 développé par Simon Chapuis (2009). Le TYPE273 permet de lire en entrée la température moyenne sur la hauteur du puits. Deux cas de validation sont utilisés et les résultats montrent que les TYPE272 et TYPE273 peuvent être utilisés avec confiance.

Finalement, les résultats expérimentaux sont comparés aux données générées par le TYPE273. Comme ce modèle peut simuler deux réseaux de puits indépendants, les branches 3 et 4 sont modélisées étant donné qu'elles présentent moins de problèmes liés à leur construction. Pour ce faire, les valeurs expérimentales du débit de circulation, de la température d'entrée du fluide dans chacune des rangées de puits ainsi que la température non perturbée sur la hauteur d'un puits sont imposées au modèle à chaque pas de temps horaire. Les températures du fluide à la sortie de chacune des deux rangées calculées par le modèle sont ensuite comparées aux températures

expérimentales correspondantes. Il est à noter que les conduites horizontales reliant les puits verticaux sont intégrées à l'assemblage TRNSYS afin de tenir compte du transfert thermique prenant place dans cette portion non-négligeable du circuit géothermique. Les résultats obtenus par la simulation se comparent plus ou moins bien avec les résultats expérimentaux. En effet, les puits de faible profondeur sont influencés par de nombreuses variables dont les températures du sol dans les premiers mètres en surface et par un long temps de résidence du fluide (de l'ordre de 8 minutes) dans les branches du circuit. Des efforts de modélisation supplémentaires sont donc requis pour parvenir à modéliser correctement des puits à faible profondeur.

ABSTRACT

This thesis presents an experimental installation of short boreholes integrated to a natural climate installation, simulating a low energy consumption building located at Électricité de France Research Center in Moret-sur-Loing. This study is divided into two parts: the design and construction of an experimental instrumented site where data is collected over one heating season, and a second part where a model, based on the finite line source method, is developed in TRNSYS simulation's environment.

The experimental site has 16 boreholes of 9 meters for which the head is buried 1 meter under ground's surface and are positioned in a square configuration. The construction methods as well as problems faced during this phase are presented in this study.

A thermal response test is performed in order to determine the soil properties. This test differs from the classic approach since it is realized on short boreholes in cold mode using the heat pump available on-site instead of the traditional heat injection method. By applying Gehlin's graphic method (1998), a soil thermal conductivity of 2,52 W/mK and an equivalent thermal resistance of 0,198 mK/W are found.

The geothermal borehole model developed in this study, TYPE273, is based on Simon Chapuis' model (2009), the TYPE272. TYPE273 also allows reading the average ground temperature on the borehole's length as an input, which is an important consideration for short boreholes. Two validation tests are realized for each of the two models (TYPE272 and TYPE273) and results show that these models can be used with confidence.

Finally, experimental data is compared to data generated by TYPE273. This model can simulate two independent networks. Therefore, branches 3 and 4 are modeled since they present less construction problems. To model this experimentation, the mass flow rate, the temperatures at the inlet of rows, as well as the average ground temperature on the borehole's length are imposed as input to TYPE273 at every hourly time step. It is then possible to compare the calculated outlet temperatures at each row to the experimental data. It should be noted that the heat transfer taking place in the horizontal pipes linking the vertical boreholes is integrated to the model. The simulation's results do not represent experimental data all that well. Short boreholes are influenced by an important number of parameters such as ground temperature in the first meters

below the ground surface and by a long residence time of the fluid (about 8 minutes) in the branches of the circuit. Further simulation efforts are thus required to model short boreholes correctly.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XXIV
INTRODUCTION.....	1
Objectifs de l'étude	2
Organisation du mémoire	2
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
1.1 Introduction	4
1.2 Généralités portant sur la géothermie.....	4
1.3 Fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique	5
1.4 Modélisation des échangeurs géothermiques verticaux	7
1.4.1 Méthode de la source linéique infinie (SLI).....	7
1.4.2 Méthode de la source cylindrique infinie (SCI)	9
1.4.3 Méthode de la source linéique finie (SLF).....	11
1.4.4 Les <i>g-functions</i> d'Eskilson	13
1.5 Géothermie verticale de faible profondeur.....	15
1.5.1 Pieux échangeurs.....	15

1.5.2	Corbeilles géothermiques.....	17
1.5.3	Capteurs IVT.....	20
1.6	Effets de surface.....	21
1.7	Résumé du chapitre.....	23
CHAPITRE 2 MODÉLISATION.....		24
2.1	Introduction.....	24
2.2	Extension des travaux de Chapuis.....	24
2.2.1	Cas de validation no.1.....	25
2.2.2	Cas de validation no.2.....	26
2.2.3	Cas de validation no.3.....	29
2.2.4	Cas d'application.....	31
2.3	Présentation du TYPE273.....	40
2.3.1	Validation du TYPE273.....	41
2.4	Résumé du chapitre.....	44
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....		45
3.1	Introduction.....	45
3.2	Localisation du site expérimental.....	45
3.3	Technique de forage.....	46
3.4	Description du champ géothermique.....	49
3.4.1	Géométrie du champ et des puits.....	49
3.4.2	Raccordement entre les puits.....	51
3.4.3	Caractéristiques et propriétés des tubes, du coulis et du fluide caloporteur.....	51
3.5	Instrumentation du site expérimental.....	52
3.6	Problèmes rencontrés lors de la construction.....	56

3.7	Description de la plate-forme « Climat naturel »	58
3.8	Résumé du chapitre	61
CHAPITRE 4 TEST DE RÉPONSE THERMIQUE.....		62
4.1	Introduction	62
4.2	Description d'un test de réponse thermique classique	62
4.3	Description du test de réponse thermique réalisé.....	62
4.3.1	Variation 1 - Circulation du fluide dans la première branche	63
4.3.2	Variation 2 – Utilisation de la PAC intégrée au site expérimental	65
4.3.3	Présentation des trois étapes du TRT réalisé.....	69
4.4	Présentation et analyse des résultats du TRT	71
4.4.1	Modélisation des sections horizontales	71
4.4.2	Analyse des résultats par la méthode graphique	74
4.5	Résumé du chapitre	81
CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES ...		82
5.1	Introduction	82
5.2	Présentation des points de mesure.....	82
5.3	Méthodologie associée au traitement de données	86
5.4	Analyse des données expérimentales	88
5.4.1	Évolution de la température extérieure	88
5.4.2	Évolution des températures de référence et du puits d'instrumentation	91
5.4.3	Évolution des températures de la paroi à 2, 5 et 9 m dans le tuyau descendant et ascendant du puits 1	92
5.4.4	Évolution des températures de la paroi à 2, 5 et 9 m dans le tuyau descendant et ascendant du puits 4	93
5.4.5	Évolution des températures intrusives du fluide dans les 4 branches	95

5.4.6	Évolution des températures intrusives du fluide de quatre couples de puits thermiquement symétriques	98
5.4.7	Évolution du débit de circulation	100
5.4.8	Évolution de la puissance à l'évaporateur	101
5.4.9	Évolution de la puissance au condenseur	103
5.5	Comparaison des résultats du TYPE273 et des données expérimentales	104
5.5.1	Choix du pas de temps pour les simulations	105
5.5.2	Intégration du TYPE952 au modèle TRNSYS	106
5.6	Résumé du chapitre	109
CONCLUSION		111
RÉFÉRENCES		113
ANNEXES		116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètres imposés au modèle TRNFLS pour le cas no.1	25
Tableau 2.2 : Paramètres du modèle DST pour le cas no.2	27
Tableau 2.3 : Paramètres utilisés dans les simulations utilisant le modèle TRNFLS	28
Tableau 2.4 : Charge de chauffage (+) et charge de climatisation (-) au sol	34
Tableau 4.1 : Paramètres imposés pour la simulation du TRT	66
Tableau 4.2 : Performance de la PAC selon la plage de température d'opération.....	67
Tableau 4.3 : Journal des évènements survenus lors des phases de chauffage et de restitution	70
Tableau 4.4 : Détermination de la valeur de k imposée dans le TYPE952.....	73
Tableau 4.5 : Étude de sensibilité de la diffusivité thermique	80
Tableau 4.6 : Étude de sensibilité de la température non perturbée du sol	81
Tableau 5.1 : Description des points de mesure.....	85
Tableau 5.2 : Tableau comparatif pour la vérification de la création du fichier mensuel regroupant les données expérimentales de Janvier 2012.....	87
Tableau 5.3 : Tableau comparatif pour la vérification de la création du fichier de compilation regroupant les données expérimentales de Novembre 2011 à Avril 2012.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1.1 : 10 capteurs enterrés de 10 m de profondeur vs 1 capteur enterré de 100 m de profondeur	1
Figure 1.1 : Représentation schématique d'un système géothermique typique et coupe transversale d'un puits.....	5
Figure 1.2 : Composantes d'une pompe à chaleur (mode chauffage – haut et mode climatisation – bas)	6
Figure 1.3 : Géométrie associée à la méthode de la source linéique infinie	8
Figure 1.4 : Géométrie associée au modèle de la source cylindrique infinie.....	9
Figure 1.5 : Géométrie associée au modèle de la ligne source finie (tiré de Chapuis, 2009)	11
Figure 1.6 : Pieux échangeurs (Tirée de Bozis, 2010)	15
Figure 1.7 : Corbeilles géothermiques (Tirées de Rehau, 2012 et BetaTherm, 2012).....	18
Figure 1.8 : Corbeilles géothermiques RAUGEO HELIX PE-Xa (Tirée de Rehau, 2012).....	19
Figure 1.9 : Corbeilles géothermiques BetaTherm (Tirée de BetaTherm, 2012)	19
Figure 1.10 : Capteurs IVT (Tirée de Cauret et Bernier, 2009)	20
Figure 1.11 : Représentation schématique du montage expérimental de l'étude de Cauret & Bernier (2009)	21
Figure 2.1: Évolution de la température moyenne mensuelle du fluide à la sortie des trois puits entre le mois de mars 2005 et juin 2006.....	26
Figure 2.2 : Variation de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits calculée par les modèles DST et TRNFLS	29
Figure 2.3 : Écart entre les valeurs calculées par les modèles DST et TRNFLS	29
Figure 2.4 : Comparaison entre la température calculée par les <i>g-functions</i> d'Eskilson et le modèle TRNFLS	31
Figure 2.5 : Installation de recharge solaire du sol (gauche) et vue du dessus des 2 réseaux de puits indépendants en configuration 9/16 (droite).....	32

Figure 2.6 : Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie sur une période de 10 ans – aucune injection solaire	35
Figure 2.7 : Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie sur une période de 10 ans – avec injection solaire	36
Figure 2.8 : Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre sur une période de 10 ans – avec injection solaire	37
Figure 2.9 : Position des nœuds additionnels pour tracer la figure 2.10	37
Figure 2.10 : Distribution de la température moyenne sur la hauteur d'un puits autour des 25 puits formant l'échangeur géothermique	38
Figure 2.11 : Distribution de température des nœuds positionnés sur la ligne $y = 16$ m (ligne centrale du champ)	39
Figure 2.12 : Évolution de la température de sortie du fluide calculée par le TYPE272 et TYPE273	41
Figure 2.13 : Écart entre la température de sortie calculée par le TYPE273 et le TYPE272	42
Figure 2.14 : Évolution de la température imposée en entrée aux deux modèles et de la température de sortie du fluide calculée par le modèle DST et le TYPE 273	43
Figure 2.15 : Écart entre la température de sortie calculée par le modèle DST et le TYPE 273 ...	43
Figure 3.1 : Localisation du site expérimental	45
Figure 3.2 : Tête de forage en trépan à molette	47
Figure 3.3 : Coupe géologique du sol	47
Figure 3.4 : Forage par rotary à boue (bac à boue illustré à droite)	47
Figure 3.5 : Écarteurs entre les tubes	48
Figure 3.6 : Remplissage manuel d'un puits	49
Figure 3.7 : Géométrie d'un puits géothermique	50
Figure 3.8 : Géométrie du champ géothermique	50
Figure 3.9 : Raccordement des tuyaux aux nourrices et débitmètre	51

Figure 3.10 : Sonde PT-100	52
Figure 3.11 : Fourreaux (en rouge) et tubes d'alimentation et de retour (en noir).....	52
Figure 3.12 : Jonctions en «T»	53
Figure 3.13 : Schéma de la branche 1	54
Figure 3.14 : Position des sondes de mesure de température de paroi dans les puits 1 et 4	54
Figure 3.15 : Fixation de la sonde sur le tube	55
Figure 3.16 : Localisation des sondes de mesures de la température du sol dans le puits d'instrumentation	55
Figure 3.17 : Fixation typique d'une sonde PT-100 dans le puits d'instrumentation	56
Figure 3.18 : Écarteur improvisé du puits 8.....	56
Figure 3.19 : Réparation de la sonde PT-100 brisée (puits 8).....	57
Figure 3.20 : Schéma d'implantation des sondes remis par le foreur	58
Figure 3.21 : Salle des machines.....	59
Figure 3.22 : Schéma de fonctionnement de l'installation.....	59
Figure 3.23 : Loi d'eau de la PAC	60
Figure 4.1 : Configuration du champ géothermique étudié	63
Figure 4.2 : Instrumentation de la branche 1 du champ de puits géothermiques étudié	64
Figure 4.3 : Schéma de fonctionnement de l'installation.....	65
Figure 4.4 : Évolution de la puissance à l'évaporateur au cours de la phase de chauffage du fluide par extraction de chaleur du sol.....	68
Figure 4.5 : Évolution des 3 températures intrusives des branches 1 et 4 ainsi que la température moyenne du fluide lors de l'essai de circulation continue	70
Figure 4.6 : Schématisation des sections horizontales de la branche 1 modélisées par le TYPE952	72

Figure 4.7 : Évolution de $\Delta T_{\text{Horizontal}}$, ΔT_{Total} et de la température à 1 m de profondeur dans le puits d'instrumentation sur la période étudiée dans la méthode graphique	74
Figure 4.8 : Évolution de la température moyenne du fluide aux sorties des puits 1 et 4 au cours de la phase d'extraction de chaleur du sol et de restitution.....	75
Figure 4.9 : Régression linéaire utilisée pour la méthode graphique	75
Figure 5.1 : Géométrie du champ de puits étudié	83
Figure 5.2 : Mesures de température dans le puits d'instrumentation	84
Figure 5.3 : Mesures de température de la paroi des tubes ascendants et descendants des puits 1 et 4.....	84
Figure 5.4 : Évolution de la température extérieure.....	89
Figure 5.5 : Comparaison des moyennes mensuelles de la température extérieure mesurée aux Renardières et celles provenant des archives de la station météo Melun-Villaroche	90
Figure 5.6 : Évolution des températures de référence et du puits d'instrumentation.....	91
Figure 5.7 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube descendant du puits 1	92
Figure 5.8 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube ascendant du puits 1	93
Figure 5.9 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube descendant du puits 4	94
Figure 5.10 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube ascendant du puits 4	94
Figure 5.11 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 1.....	95
Figure 5.12 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 2.....	96
Figure 5.13 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 3.....	97
Figure 5.14 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 4.....	97
Figure 5.15 : Évolution de la température intrusive à l'entrée des puits 1 et 16.....	98

Figure 5.16 : Évolution de la température intrusive à l'entrée des puits 8 et 9.....	99
Figure 5.17 : Évolution de la température intrusive à la sortie des puits 5 et 12	99
Figure 5.18 : Évolution de la température intrusive à la sortie des puits 4 et 13	100
Figure 5.19 : Évolution du débit de fluide circulant dans le système géothermique	101
Figure 5.20 : Évolution de la puissance à l'évaporateur (moyenne glissante sur 60 minutes)	102
Figure 5.21 : Évolution de la puissance au condenseur (moyenne glissante sur 60 minutes) et des besoins de chauffage	103

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Surface (m^2)
B	Distance centre-à-centre entre les puits (m)
BBC	Bâtiment à basse consommation énergétique
<i>Capacité</i>	Capacité de refroidissement (tonnes ou kW)
C_p	Chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
COP	Coefficient de performance
D	Hauteur d'enfouissement de la tête du puits (m)
d_{int}	Diamètre intérieur du tuyau (m)
dT	Différence entre la température du sol à un point $p(r,z)$ et la température du sol non perturbé ($^{\circ}\text{C}$)
EES	Engineering Equation Solver
$efrc$	Fonction d'erreur complémentaire
$E_{thermique}$	Énergie thermique (kWh)
$E_{électrique}$	Énergie électrique (kWh)
E_{utile}	Énergie utile fournie par la PAC (kWh)
$E_{fournie}$	Énergie utile fournie à la PAC (kWh)
f	Facteur de friction de Moody
Fo	Nombre de Fourier
g	Gradient géothermique ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)
g	<i>g-function</i>
g	Accélération gravitationnelle ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
G	Rayonnement solaire incident ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
G	Coefficient de déperdition volumique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)

H	Hauteur d'un puits (sous la tête du puits) (m)
h	Variable d'intégration
h_i	Coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
J_0	Fonction de Bessel de premier type d'ordre 0
J_1	Fonction de Bessel de premier type d'ordre 1
k	Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
L	Longueur de tuyau (m)
l_f	Perte de charge (m de fluide)
\dot{m}	Débit massique de fluide ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
n	Nombre de jours après le 1 ^{er} janvier où la température extérieure atteint la valeur minimale annuelle (jours)
Nu	Nombre de Nusselt
p	Rapport entre le rayon où la température est calculée (r) et le rayon du puits (r_b)
PAC	Pompe à chaleur
$P_{consommée}$	Puissance consommée par la PAC (kW)
$P_{condenseur}$	Puissance au condenseur (kW)
P_e	Puissance électrique à l'entrée du groupe moteur-pompe (W ou HP)
$P_{évaporateur}$	Puissance à l'évaporateur (kW)
P_f	Puissance transmise au fluide par la pompe de circulation (W ou HP)
P_{utile}	Puissance utile (kW)
Pr	Nombre de Prandtl
Q	Taux de transfert de chaleur (W)
q	Taux de transfert de chaleur par unité de longueur ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)
\bar{q}	Taux de transfert de chaleur par unité de longueur moyen ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)

q'_g	Flux géothermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
$q_{\text{paroi-fluide}}$	Taux de transfert de chaleur par unité de longueur entre la paroi du tuyau et le fluide ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$)
r	Distance du point de mesure par rapport au centre du puits (m)
r_b	Rayon du puits (m)
R_b	Résistance thermique du puits ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
Re	Nombre de Reynolds
R_{film}	Résistance thermique de film ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
r_{i-j}	Distance centre-à-centre entre les puits «i» et «j» (m)
r_i	Rayon intérieur du tuyau (m)
RMS	<i>Root mean square</i>
r_o	Rayon extérieur du tuyau (m)
R_{tuyau}	Résistance thermique du tuyau ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
T	Température ($^{\circ}\text{C}$)
t	Temps (s, h ou jours)
T_1	Demi-amplitude de la variation de la température non perturbée à la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	Température à la paroi du puits ($^{\circ}\text{C}$)
t_c	Durée d'un cycle (année)
$\Delta T_{\text{Horizontal}}$	Écart de température dans les sections horizontales estimé par le TYPE952 ($^{\circ}\text{C}$)
$\Delta T_{\text{Vertical}}$	Différence de température dans la portion verticale des puits ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{Total}	Somme de $\Delta T_{\text{Horizontal}}$ et $\Delta T_{\text{Vertical}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{in}	Température du fluide à l'entrée des puits ($^{\circ}\text{C}$)
T_{out}	Température du fluide à la sortie des puits ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{f, moy}$	Température moyenne du fluide dans les puits (°C)
T_g	Température du sol non perturbé (°C)
\bar{T}_g	Température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur du puits (°C)
T_m	Température moyenne du fluide (°C)
T_o	Température moyenne annuelle de la surface du sol (°C)
T_r	Température du sol à une distance r du centre du puits (°C)
$t_{résidence}$	Temps de résidence du fluide dans une conduite (min)
TRT	Test de réponse thermique
t_s	Temps caractéristique utilisé dans les g -functions (jour)
$TRNSYS$	TRaNsient SYstem Simulation program
$TRNFLS$	TRaNsient Finite Line Source model
U	Coefficient de déperdition thermique volumique du BBC ($W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)
V	Volume chauffé (m^3)
v	Vitesse moyenne du fluide dans le tuyau ($m \cdot s^{-1}$)
\dot{V}	Débit volumique (unité de volume par unité de temps)
$\dot{W}_{compresseur}$	Puissance du compresseur (kW)
Y_0	Fonction de Bessel de deuxième type d'ordre 0
Y_1	Fonction de Bessel de deuxième type d'ordre 1
z	Distance verticale du point de mesure par rapport à la surface du sol (m)

Lettres grecques

α	Diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
β	Variable d'intégration
γ	Constante d'Euler, soit 0,5772
ρ	Masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
η_{capteur}	Rendement du capteur solaire
η_{pompe}	Rendement de la pompe
μ	Viscosité dynamique du fluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits

ANNEXE 2 – Équation donnant la température de l'air à partir du fichier météo horaire de l'aéroport international Montréal-Trudeau

ANNEXE 3 – Température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits calculée à partir de la température de l'air extérieur

ANNEXE 4 – Modélisation des sections horizontales du champ géothermique

ANNEXE 5 – Temps de résidence du fluide dans une branche de 4 puits

ANNEXE 6 – Module GEOEASE permettant de calculer le nombre de Reynolds, la puissance de pompage et les pertes de charge pour une configuration donnée de site géothermique

INTRODUCTION

Une des voies explorées pour réduire les coûts des capteurs enterrés verticaux est la réduction de la profondeur des puits, réduction qui permettrait d'utiliser d'autres techniques de construction des capteurs enterrés potentiellement moins coûteuses. Ainsi, il est envisagé de réduire d'un facteur 10 la longueur des capteurs tout en augmentant leur nombre dans les mêmes proportions. Ainsi, pour une résidence moyenne, le capteur enterré typique de 100 m de profondeur serait remplacé par 10 capteurs de 10 m de profondeur tel qu'illustré à la figure 0.1.

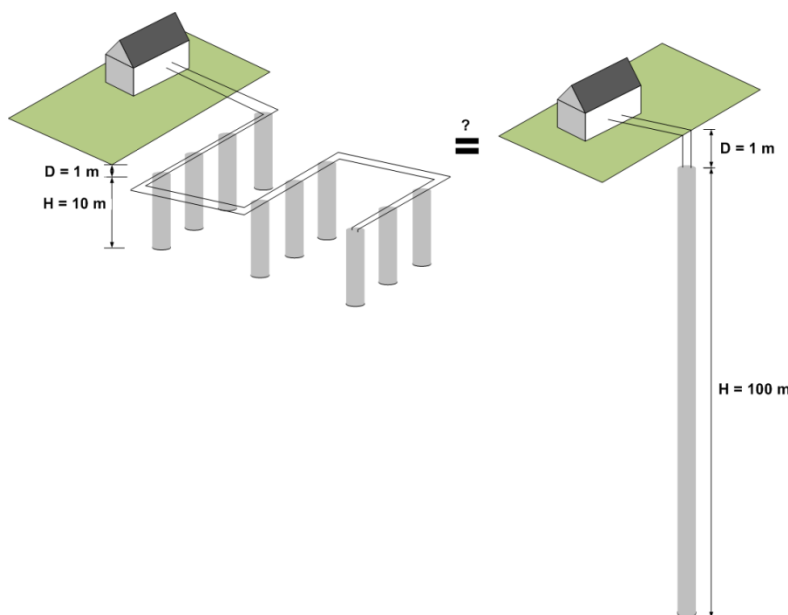


Figure 0.1.1 : 10 capteurs enterrés de 10 m de profondeur vs 1 capteur enterré de 100 m de profondeur

Bien que cette géométrie à faible profondeur offre certains avantages, il existe quelques incertitudes opérationnelles qui méritent d'être étudiées. Un des problèmes potentiels est lié au fait que les puits de faible profondeur sont davantage influencés par les conditions de surface que les puits profonds. Ceci pourrait engendrer une baisse des performances et une augmentation du nombre de puits requis. Ainsi, en se rapportant à la figure 0.1, il est facile de réaliser que la profondeur d'enfouissement de la tête des puits (distance D) aura une plus grande influence sur les puits courts.

L'approche classique de Kusuda, basée sur une variation sinusoïdale de la température de l'air pour calculer la température du sol, doit être réexaminée pour tenir compte de l'évolution réelle de la température du sol en fonction d'une variation de la température de l'air.

Le raccordement des puits entre eux constitue une autre problématique à examiner. Un raccordement en parallèle de tous les puits permet de réduire les pertes de charge et la puissance de pompage mais augmente la résistance thermique des puits, car les faibles débits engendrent un écoulement laminaire. À l’opposé, un raccordement en série permet de maintenir l’écoulement turbulent, mais cela signifie que les puits ne sont pas sollicités également car la température d’entrée varie d’un puits à l’autre.

En termes de modélisation, peu d’études se sont attardées à la problématique des puits peu profonds. Par exemple, les *g-functions*, qui sont souvent utilisées pour des configurations classiques, ne sont pas adaptées à l’étude des puits peu profonds car elles ont été développées pour des rapports D/H de l’ordre de 0,04, où D est la profondeur d’enfouissement de la tête du puits et H la profondeur du puits, alors que ce rapport est de l’ordre de 0,1 pour les puits peu profonds. Les travaux de Chapuis (2009) et en particulier le TYPE272 créé dans l’environnement TRNSYS constitue un point de départ intéressant pour modéliser les puits peu profonds.

Objectifs de l’étude

L’objectif général de ce projet est d’évaluer la performance énergétique de capteurs enterrés verticaux peu profonds en vue d’établir des recommandations quant à leur utilisation.

Cet objectif général se décline en quelques étapes :

1. Compléter et valider les travaux de Chapuis sur la modélisation d’un champ géothermique de configuration arbitraire;
2. Développer un utilitaire de calcul des pertes de charge et de la puissance de pompage;
3. Adapter les travaux de Chapuis pour la modélisation des capteurs enterrés peu profonds;
4. Réaliser une série d’expériences de façon à valider les efforts de modélisation;

Ce projet s’appuie sur la plate-forme expérimentale en climat réel d’EDF et sur la version existante du TYPE272 développé par Simon Chapuis dans le cadre de son projet de maîtrise à l’École Polytechnique de Montréal.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en 5 chapitres. Le chapitre 1 porte sur la revue de la littérature, le chapitre 2 présente un modèle de puits géothermique basé sur les travaux de Simon Chapuis ainsi qu’une

version modifiée. Le chapitre 3 traite de la description du montage expérimental alors que le chapitre 4 aborde le test de réponse thermique réalisé en octobre 2011. Finalement, le chapitre 5 présente l'ensemble des résultats expérimentaux ainsi qu'une comparaison de ces résultats avec un modèle développé sous TRNSYS.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents ouvrages et concepts sur lesquels se base ce travail de recherche. La revue de la littérature est divisée en cinq sections. Elle débute par une présentation générale sur la géothermie et sur le fonctionnement d'une pompe à chaleur. Ensuite, les différentes méthodes de modélisation applicables aux puits à faible profondeur sont présentées suivies d'une revue des différents produits commerciaux existants dans ce domaine. Finalement, le chapitre se termine par une discussion sur l'influence des effets de surface sur les puits à faible profondeur.

1.2 Généralités portant sur la géothermie

La société savante ASHRAE (ASHRAE, 2007) classe l'énergie géothermique selon trois plages de température, soit :

- Géothermie haute température ($T > 150^{\circ}\text{C}$) : production électrique par capture de vapeur ou eau chaude pressurisée à haute température alimentant des turbines.
- Géothermie moyenne température ($150^{\circ}\text{C} < T < 32^{\circ}\text{C}$) : capture de chaleur pour des applications directes.
- Géothermie basse température ($T < 32^{\circ}\text{C}$) : capture de chaleur pour des applications utilisant des pompes à chaleur.

La présente étude porte sur la géothermie basse température exploitée par un système de capteurs enterrés verticaux de faible profondeur en boucle fermée. Tel que montré à la figure 1.1, un système géothermique vertical en boucle fermée conventionnel comprend un échangeur de chaleur souterrain formé de un ou plusieurs tube(s) en «U» de polyéthylène haute densité (PEHD) entourés de coulis afin de protéger l'aquifère et d'augmenter le transfert de chaleur. Le tout est relié à une ou plusieurs pompe(s) à chaleur (PAC). Une résidence de taille moyenne et bien isolée nécessitera un puits d'environ 100 mètres de profondeur afin de répondre à ses besoins de chauffage et climatisation. En mode chauffage, le fluide caloporteur froid quitte la résidence, parcourt le tube en «U» où il capte la chaleur du sol et retourne plus chaud à la PAC

qui rehausse le niveau de température afin de permettre de chauffer la résidence. En mode climatisation, le fluide caloporteur chauffé par l'action de la PAC parcourt le tube en «U» où il rejette sa chaleur dans le sol et retourne plus froid à la PAC qui abaisse le niveau de température afin de climatiser la résidence.

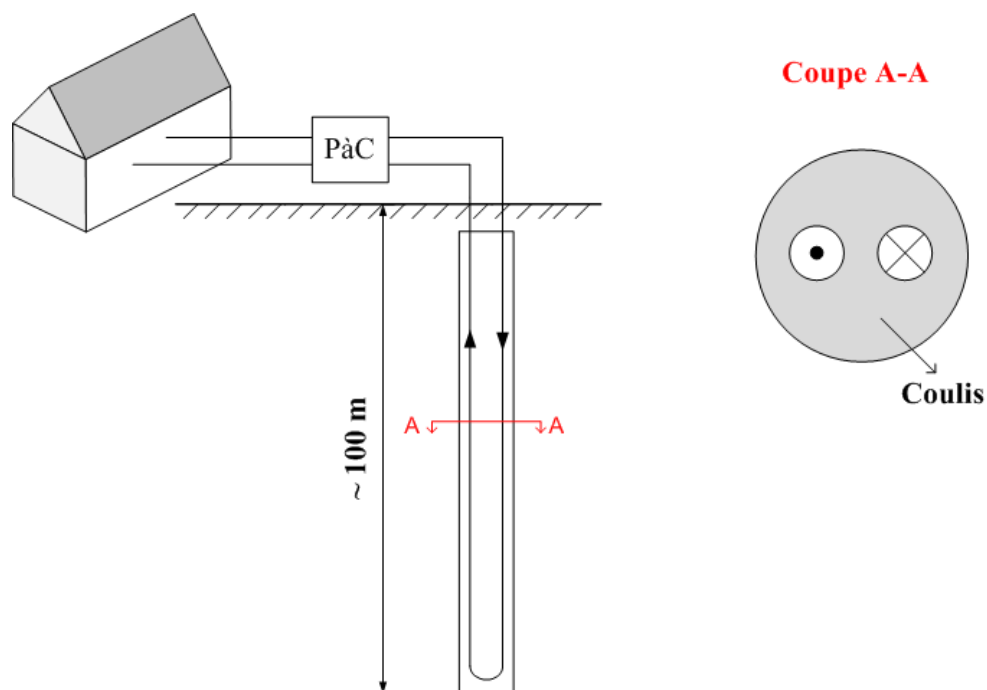


Figure 1.1 : Représentation schématique d'un système géothermique typique et coupe transversale d'un puits

1.3 Fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique

Une pompe à chaleur (PAC) permet d'extraire de la chaleur d'un réservoir froid (source) afin de la transmettre à un réservoir chaud (puits). Typiquement, une PAC renferme un circuit fermé où circule un réfrigérant à travers quatre composantes soit un évaporateur, une valve d'expansion, un condenseur et un compresseur tel qu'illustré à la figure 1.2. Une valve réversible permet d'inverser le sens de l'écoulement afin que la PAC fonctionne en chauffage ou climatisation.

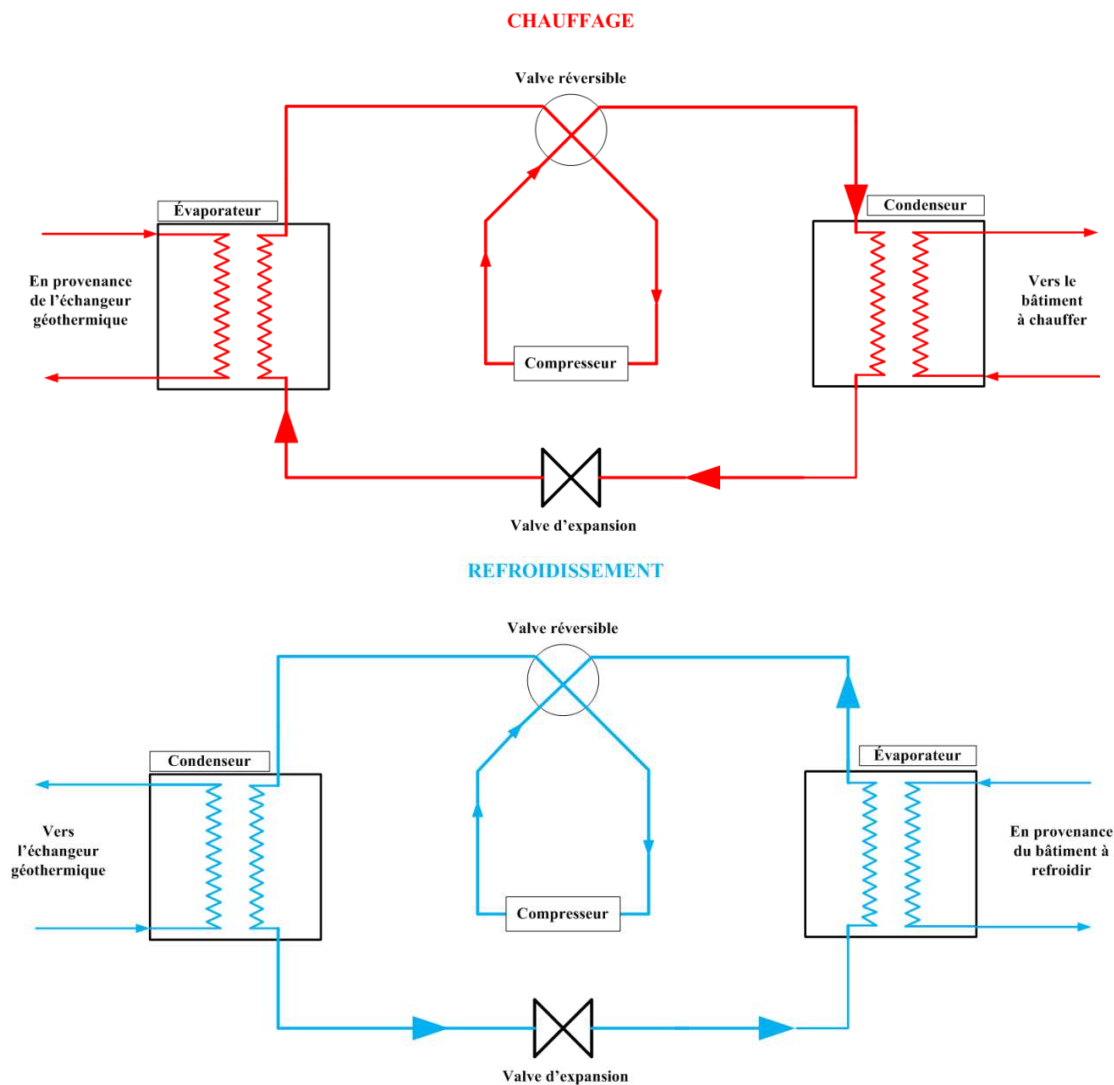


Figure 1.2 : Composantes d'une pompe à chaleur (mode chauffage – haut et mode climatisation – bas)

Dans le cas où la pompe à chaleur est reliée à un échangeur géothermique, ce dernier agit comme source ou puits dépendant du mode d'utilisation. En mode chauffage, le fluide caloporteur capte la chaleur dans le sol et échange ensuite sa chaleur du côté évaporateur puis chauffe le réfrigérant. Celui-ci entre alors dans le compresseur sous forme de vapeur saturée (ou légèrement surchauffée) où il subit une augmentation de pression et de température. La vapeur surchauffée sortant du compresseur est acheminée au condenseur où elle cède sa chaleur au milieu chaud, c'est-à-dire le bâtiment à chauffer. Le réfrigérant se condense et circule à travers une valve d'expansion où sa température et sa pression diminuent. Le cycle se complète par le retour du

réfrigérant dans l'évaporateur. En mode climatisation, le réservoir froid correspond au bâtiment à climatiser et le réservoir chaud à l'échangeur géothermique.

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur correspond au rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie à la PAC :

$$COP = \frac{E_{utile}}{E_{fournie}} \quad (1.1)$$

L'énergie fournie à la PAC est essentiellement liée à l'opération du compresseur. Typiquement, le COP d'une PAC géothermique varie entre 3 et 6 que ce soit en chauffage ou en climatisation. Le COP varie en fonction de la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur ou du condenseur. En mode chauffage, plus la température à l'entrée de l'évaporateur est élevée, plus le COP est élevé alors qu'en mode climatisation, plus la température à l'entrée du condenseur est faible, plus le COP est élevé. La plupart des PAC géothermiques commerciales ne peuvent opérer à une température d'entrée du fluide (i.e la température de retour du puits géothermique) plus basse qu'environ -7°C en mode chauffage et plus haute que 50°C en mode climatisation (M. Bernier, 2006).

1.4 Modélisation des échangeurs géothermiques verticaux

La modélisation d'un puits géothermique peut être réalisée en employant différentes méthodes qu'elles soient analytiques, numériques ou hybrides. Trois méthodes analytiques sont présentées ici, soit les méthodes de la source linéique infinie, de la source cylindrique infinie et de la source linéique finie. Cette dernière est d'ailleurs utilisée dans le modèle présenté au chapitre 2. Ces trois méthodes ont été comparées par Philippe et al. (2009). S'ajoutent à ces trois méthodes, les *g-functions* d'Eskilson qui sont brièvement présentées à la fin de la section 1.4.

1.4.1 Méthode de la source linéique infinie (SLI)

La méthode de la source linéique infinie est basée sur la solution du point source présentée dans les travaux de Lord Kelvin (1882), d'Ingersoll et al. (1954) et de Carslaw & Jaeger (1959). Appliquée à la géothermie, cette méthode permet de prédire un profil de température radial autour d'un puits suffisamment profond pour être considéré de longueur infinie et situé dans un

milieu homogène où une quantité constante de chaleur par unité de longueur est puisée ou rejetée. La figure 1.3 présente la géométrie associée à cette méthode.

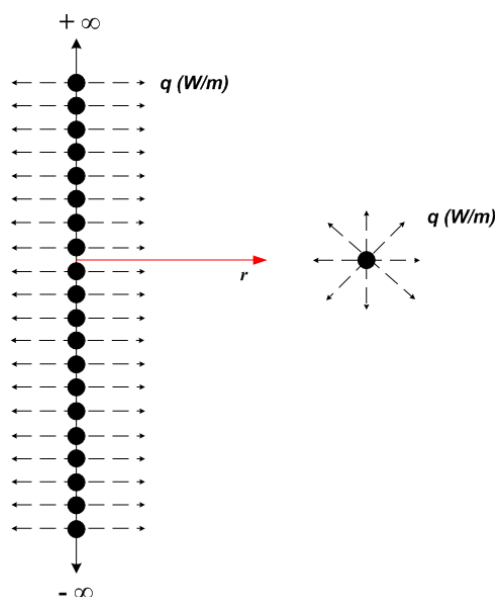


Figure 1.3 : Géométrie associée à la méthode de la source linéique infinie

L'écart de température entre un point situé à une distance r du centre du puits et la température du sol non perturbé s'exprime comme suit :

$$T_r - T_g = \frac{q}{2\pi k} \int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (1.2)$$

où

T_r est la température du sol à une distance r du centre du puits ($^{\circ}\text{C}$)

T_g est la température du sol non perturbé ($^{\circ}\text{C}$)

q est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur du puits (W/m)

k est la conductivité thermique du sol (W/mK)

r est la distance du point de mesure par rapport au centre du puits (m)

α est la diffusivité thermique du sol (m^2/s)

t est le temps (s)

β est la variable d'intégration

Selon Ingersoll et al. (1954), la méthode de la source linéique infinie est valide pour $Fo = \frac{\alpha t}{r^2} > 20$, où Fo est le nombre de Fourier. À l'intérieur de cet intervalle la SLI génère des résultats présentant moins de 2% d'écart avec la méthode de la source cylindrique infinie, une méthode plus précise. Comme c'est une méthode qui prédit le transfert de chaleur radial, la conduction axiale, surtout présente aux extrémités, n'est pas considérée. Cela entraîne des résultats imprécis lorsque l'analyse est effectuée sur une longue période.

1.4.2 Méthode de la source cylindrique infinie (SCI)

La méthode de la source cylindrique infinie, introduite par Carslaw & Jaeger (1959) ainsi qu'Ingersoll et al. (1954), permet de prédire le profil de température radial autour d'une source cylindrique de longueur infinie localisée dans un milieu homogène où une quantité constante de chaleur par unité de longueur est puisée ou rejetée. Cette méthode est développée selon deux approches, soit avec une condition frontière de taux de transfert de chaleur constant ou avec une condition frontière de température à la paroi du cylindre. La condition frontière de taux de chaleur constant est la plus utilisée et sera donc celle présentée dans le cadre de cette étude. Le lecteur est référé au mémoire de Sheriff (2007) pour une présentation approfondie du deuxième développement de la méthode SCI avec température constante à la paroi du cylindre. La figure 1.4 présente la géométrie associée au modèle de la source cylindrique infinie.

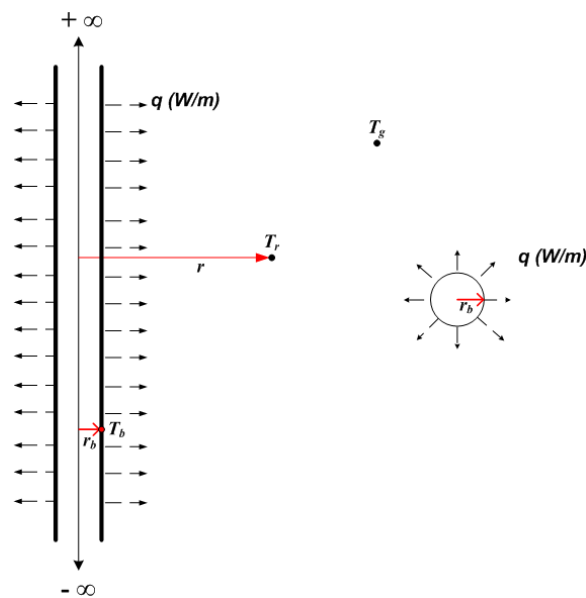


Figure 1.4 : Géométrie associée au modèle de la source cylindrique infinie

Le transfert de chaleur radial autour d'un cylindre est régi par l'équation gouvernante suivante :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \quad (1.3)$$

Carslaw & Jaeger (1959) proposent une solution à l'équation 1.3 menant à l'équation suivante :

$$T_g - T_r = q \frac{G(For, p)}{k} \quad (1.4)$$

où

p est le rapport entre le rayon où la température est calculée (r) et le rayon du puits (r_b)

Le facteur $G(For, p)$ est donné par :

$$G(For, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta \quad (1.5)$$

$$f(\beta) = \frac{(e^{-(\beta^2 For)} - 1)[J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (1.6)$$

où

β est une variable d'intégration

Les fonctions J et Y sont les fonctions de Bessel de premier et deuxième type respectivement et d'ordre 0 ou 1.

Puisque cette intégrale requiert un temps de calcul important, différentes méthodes ont été développées afin d'évaluer le facteur G . Veillon (1972) propose une technique d'inversion numérique reprise par Hellström (1991). Ingersoll et al. (1954) ont pré-calculé l'intégrale et tabulé les résultats pour plusieurs valeurs de For et quatre valeurs de p , soit 1, 2, 5 et 10. Bernier

(2001) a effectué un lissage de courbe de la fonction G pour $p = 1, 2, 5$ et 10 afin d'en faciliter son utilisation. Finalement, Cooper (1976) présente une approximation de la fonction G pour $p = 1$, c'est-à-dire lorsque $r = r_b$. Tel que mentionné précédemment, cette méthode produit des résultats plus précis que la SLI pour des valeurs de $Fo < 20$, soit pour des grands diamètres et des temps d'opération courts. Tout comme la SLI, la SCI est une solution au transfert de chaleur radial seulement et la conduction axiale n'est pas considérée.

1.4.3 Méthode de la source linéique finie (SLF)

La méthode de la source linéique finie, présentée par Eskilson (1987) et Zeng et al. (2002), permet de calculer le profil de température 2-D (r, z) à partir d'une source verticale de longueur finie soumis à un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur.

La figure 1.5 présente la géométrie du modèle de la ligne source finie tel que développé par Zeng et al. (2002).

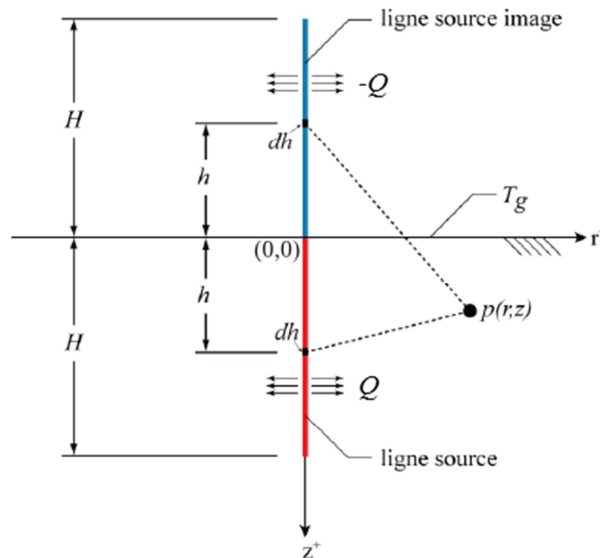


Figure 1.5 : Géométrie associée au modèle de la ligne source finie (tiré de Chapuis, 2009)

Afin de maintenir une condition frontière de température de la surface du sol constante, une source miroir, mais de taux de transfert de chaleur inverse est utilisée. Chaque incrément de la source linéique, dh , peut être considéré comme une source de chaleur ponctuelle émettant un taux de transfert de chaleur par unité de longueur, q , constant. Ce modèle exprime l'augmentation de température du sol au point $p(r, z)$ au temps t par :

$$dT(r, z, t) = \frac{qdh}{4k\pi\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}} \right] \quad (1.7)$$

où

dT est la différence entre la température du sol à un point $p(r, z)$ et la température du sol non perturbé ($^{\circ}\text{C}$)

z est la distance verticale du point de mesure p par rapport à la surface du sol (m)

h est une variable d'intégration

La solution en régime transitoire pour une ligne source verticale débutant à $z=0$ et de longueur H est obtenue en intégrant l'équation 1.7 de 0 à H tel que montré à l'équation 1.8.

$$T(r, z, t) - T_0 = \frac{q}{4k\pi} \times \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}} \right]}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{at}} \right]}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (1.8)$$

où

T_0 est la température du sol non perturbé ($^{\circ}\text{C}$)

L'équation 1.9 présente une solution présentée par Sheriff (2007) permettant d'évaluer la température au point $p(r, z)$ lorsque t tend vers l'infini (régime permanent).

$$T(r, z) - T_0 = \frac{q}{4k\pi} \times \ln \left[\frac{\sqrt{(H-z)^2 + r^2} + H - z}{\sqrt{(H+z)^2 + r^2} + H + z} \times \frac{2z^2 + 2z\sqrt{r^2 + z^2} + r^2}{r^2} \right] \quad (1.9)$$

Comme l'écart de température entre la température à un point r et le sol non perturbé varie en fonction de la profondeur, il est utile de calculer la variation de température moyenne sur la hauteur du puits H .

La température moyenne sur la hauteur H à une distance r est donnée par :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{1}{H} \int_0^H T(r, z, t) dz \quad (1.10)$$

La solution de l'équation 1.10 requiert une double intégration qui est parfois lourde à réaliser. Lamarche et Beauchamp (2007) proposent une solution comportant une intégrale de moins permettant ainsi d'évaluer la température moyenne sur la hauteur du puits à un point situé à une distance r du centre du puits. Chapuis (2009) ajuste cette méthode afin d'évaluer la température moyenne sur la hauteur pour un puits dont la tête est située sous la surface du sol. De plus, cette méthode analytique est à la base du TYPE272, modèle implanté dans l'environnement de simulation TRNSYS et développé par Chapuis (2009), permettant de simuler le comportement d'un échangeur géothermique vertical en boucle fermée. Ce modèle a la particularité de permettre à l'utilisateur de définir le positionnement des puits et de modéliser deux réseaux indépendants de puits géothermiques. Le chapitre 2 présente ce modèle et ses améliorations plus en détails.

1.4.4 Les *g-functions* d'Eskilson

Les *g-functions*, proposées par Eskilson (1987), permettent d'évaluer rapidement la température à la paroi d'un puits. Celle-ci est exprimée comme une fonction de la conductivité thermique du sol, du taux de transfert de chaleur, d'un ratio temporel, du ratio entre le rayon et la hauteur d'un puits, du ratio entre l'espacement des puits et leur hauteur ainsi que de la configuration du champ. L'équation 1.11 présente cette relation.

$$T_b = T_g + \frac{q}{2\pi k} \times g \left[t/t_s, r_b/H, B/H, configuration\ du\ champ \right] \quad (1.11)$$

où

T_b est la température à la paroi du puits (°C)

g est la *g-function* (-)

t_s est une constante temporelle définie par $t_s = \frac{H^2}{9\alpha}$ (s)

r_b est le rayon du puits (m)

H est la hauteur d'un puits (m)

B est l'espacement entre les puits (m)

Il est intéressant de noter que lorsque le ratio $\frac{q}{2\pi k}$ est égal à 1, alors la *g-function* est égale à $T_b - T_g$, soit la différence de température entre la température à la paroi du puits et la température du sol non-perturbé.

Afin de déterminer les facteurs de réponse que sont les *g-functions*, Eskilson évalue la distribution de température autour d'un puits en solutionnant l'équation du transfert thermique transitoire bidimensionnel (équation 1.12) en coordonnées cylindriques.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.12)$$

où

r est la coordonnée radiale

z est la coordonnée axiale

Il est à noter que les hypothèses suivantes sont appliquées par Eskilson :

1. La température à la surface du sol est constante et égale à la température moyenne annuelle de l'air;
2. Le sol est un milieu homogène;
3. La tête du puits est isolée et est située à 4 ou 5 mètres de la surface du sol;
4. La température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur du puits est égale à :

$$\bar{T}_g = T_s + \frac{q'_g}{k} \left(D + \frac{H}{2} \right) \quad (1.13)$$

où

\bar{T}_g est la température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur du puits (°C)

T_s est la température à la surface du sol (°C)

q'_g est le flux géothermique (Wm^{-2})

D est la hauteur d'enfouissement de la tête du puits (m)

En utilisant le principe de superposition spatiale, Eskilson détermine ensuite la réponse thermique pour un champ de plusieurs puits. Les *g-functions* sont disponibles pour un certain nombre de configurations rectangulaires ou carrées de champ de puits et pour $D = 4$ ou 5 m. Certains logiciels contiennent plusieurs *g-functions* pré-calculées pour différentes configurations de champ de puits.

1.5 Géothermie verticale de faible profondeur

Les systèmes géothermiques de faible profondeur (<10 m) commencent à être développés commercialement sous différentes formes. L'intérêt principal de ces systèmes réside dans le fait qu'il est possible de se passer des coûteux forages géothermiques conventionnels. Trois produits commerciaux sont présentés ici, soit les pieux échangeurs (*Energy piles*), les corbeilles géothermiques ainsi que les capteurs IVT.

1.5.1 Pieux échangeurs

La géothermie par pieux échangeurs consiste à insérer un circuit en boucle fermée dans les pieux des fondations d'un bâtiment et de relier ce circuit à une pompe à chaleur. L'avantage d'un tel système réside dans le fait que le surcoût pour l'installation du système géothermique est faible puisque l'excavation des fondations doit être réalisée de toute façon. En général, la configuration des tubes du circuit est en «U» ou en spirale puis la fondation est remplie de béton. La figure 1.6, tirée de Bozis (2010), présente ce type de système.

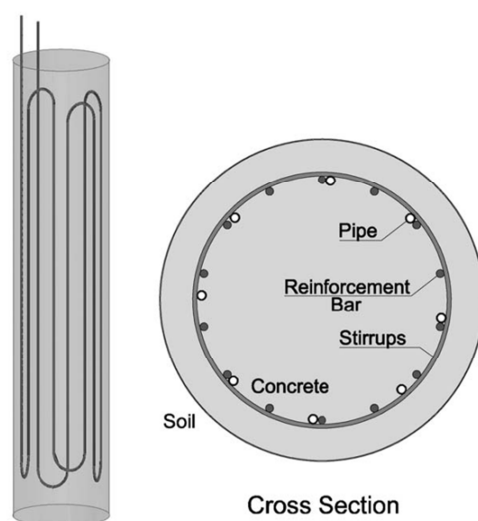


Figure 1.6 : Pieux échangeurs (Tirée de Bozis, 2010)

Bozis (2010) présente une méthode permettant d'analyser l'influence des différents paramètres de design des pieux échangeurs sur l'efficacité du transfert de chaleur. L'application de la méthodologie proposée, basée sur la méthode de la ligne source, permet de tirer les conclusions suivantes : i) L'efficacité du transfert de chaleur augmente lorsque le diamètre du pieu augmente; ii) La résistance thermique du puits dépend principalement du nombre de tubes en «U» installés dans un pieu. Plus le nombre de tubes augmente, plus la résistance du puits diminue; iii) La réduction de la résistance thermique du puits est obtenue en faisant varier le diamètre et l'épaisseur de la paroi des tubes en «U» ainsi que les conditions d'écoulement du fluide à l'intérieur des tubes; iv) L'efficacité du transfert de chaleur est plus élevée dans un échangeur pieu que dans un système vertical conventionnel en boucle fermée de la même longueur.

Cui (2011) se penche sur l'amélioration d'un modèle de pieu échangeur comportant un circuit en configuration spiralée. Précédemment, le modèle de pieu échangeur correspondait à un cylindre plein de longueur finie alors que ce qui est proposé correspond à une superposition d'anneaux de tube à l'intérieur d'une surface cylindrée. Ce modèle permet de tenir compte de la discontinuité de la source de chaleur. La solution analytique, des modèles de longueur finie et infinie, est développée à partir de la théorie de la fonction de Green et la méthode de l'image. Les simulations réalisées montrent que le modèle de longueur infinie tend vers une réponse thermique supérieure à celle obtenue par le modèle de longueur finie. Cela s'explique par le fait que ce dernier néglige les transferts thermiques à travers les surfaces au-dessus et dessous le pieu. Ainsi, les modèles de longueur finie et infinie présentent une bonne corrélation sur de courtes périodes de temps, mais pour des essais sur de longues périodes, il devient nécessaire de considérer les échanges thermiques à travers les surfaces au-dessus et dessous le pieu.

Jalaluddin (2011) évalue la performance thermique de trois échangeurs géothermiques (double et simple tubes en «U» ainsi que multi-tubes) aménagés à l'intérieur de pieux de 20 m de profondeur formé d'un cuvelage d'acier et rempli d'un mélange de silice et sable. Les résultats montrent que : i) Le double tube en «U» génère le plus haut taux de transfert de chaleur suivi du multi-tubes et finalement du simple tube en «U»; ii) Pour la configuration double tube en «U», il est préférable d'isoler le tube de sortie afin de limiter le transfert de chaleur avec le tube d'entrée et ainsi augmenter la performance thermique de l'échangeur. Il est toutefois important de souligner le coût important de ce type de système ainsi que la possibilité de fuite de fluide dans le sol; iii) Le taux de transfert de chaleur généré par le double tube en «U» et le multi-tubes

augmente lorsque de hauts débits circulent (8 L/min) alors que le taux de transfert de chaleur du simple tube en «U» demeure constant. Le double tube en «U» et le multi-tubes peuvent être utilisés dans une grande variété d'applications; iv) Pour des applications à haut débit, le multi-tubes est un choix intéressant en raison du taux de transfert thermique significativement plus grand que pour le simple tube en «U» et du coût de construction inférieur à la configuration double tube en «U».

Katsura et al. (2008) présentent un algorithme permettant de calculer la température du sol et du fluide caloporteur dans un arrangement de multiple puits géothermiques de faible profondeur. Ce modèle considère le sol comme un solide aux propriétés uniformes et constantes et l'échangeur vertical comme une source de chaleur linéique ou cylindrique de longueur infinie. La validité de cet algorithme est vérifiée en comparant les résultats générés par l'outil de dimensionnement développé aux données enregistrées lors d'une expérimentation effectuée à Hanamaki au Japon et comportant 25 pieux échangeurs de 8 mètres de profondeurs liés à une pompe à chaleur de 2 HP. Les résultats montrent que l'assemblage en série ou en parallèle influence la quantité de chaleur extraite du sol et que l'opération d'une telle configuration de puits de faible profondeur peut répondre aux besoins de chauffage des régions froides du Japon. De plus, l'étude montre qu'un système formé de 20 puits de 8 mètres de profondeur en configuration 4 x 5 permet d'extraire pratiquement la même quantité de chaleur du sol qu'un puits de 160 mètres de profondeur lorsque les demandes de chauffage et climatisation s'équilibrent sur la période étudiée. Finalement, l'outil de dimensionnement permet de prédire les températures de façon suffisamment précise et rapide.

1.5.2 Corbeilles géothermiques

Ce produit commercial est développé par quelques compagnies telles que Rehau et BetaTherm. La figure 1.7 présente les corbeilles Rehau (gauche) et BetaTherm (droite).

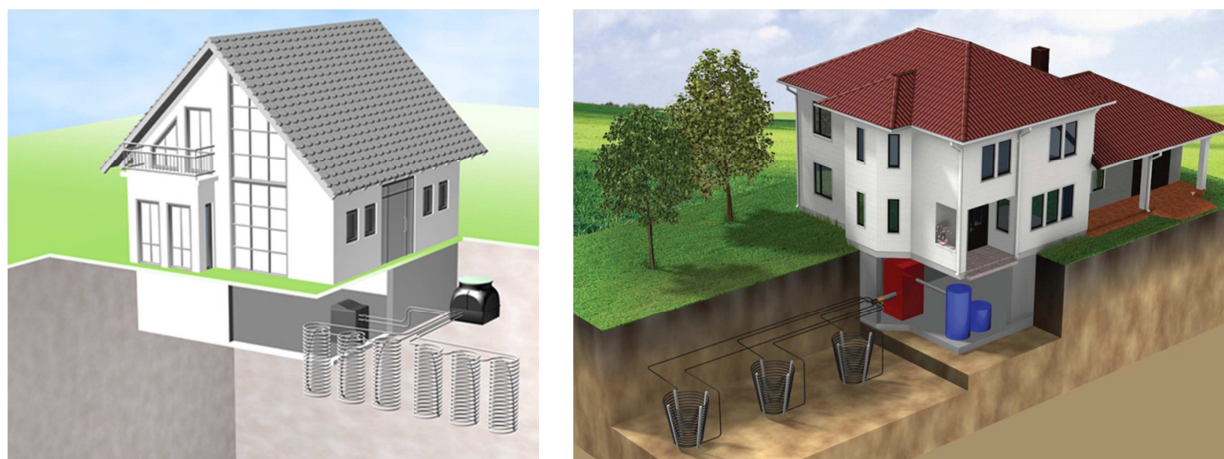


Figure 1.7 : Corbeilles géothermiques (Tirées de Rehau, 2012 et BetaTherm, 2012)

Becmeur (2011) présente une étude, réalisée en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), portant sur le comportement thermique de ce type d'échangeur pour différentes configurations notamment en série ou en parallèle. De plus, cette étude présente un modèle simplifié de corbeille géothermique. Selon les résultats expérimentaux, le transfert de chaleur augmente avec la profondeur à laquelle la corbeille est installée. Lorsque les corbeilles sont superposées plutôt qu'alignées, la puissance délivrée est environ 1,2 fois plus importante. Un écart de moins de $0,5^{\circ}\text{C}$ est remarqué entre les résultats expérimentaux et ceux générés par le modèle simplifié par différences finies développé dans excel. Selon la modélisation, il n'existe pas de différence significative entre la puissance extraite lorsque la corbeille est sollicitée en cycles courts répétés par rapport à un cycle long.

1.5.2.1 Corbeilles géothermiques Rehau

Les sondes RAUGEO HELIX PE-Xa sont formées d'un tube de polyéthylène réticulé d'une longueur de 40 m enroulé suivant une forme spiralée, tel qu'illustré à la figure 1.8. Dans les conditions idéales, il est possible d'extraire 700 W de puissance thermique par capteur HELIX. Le lecteur est référé au site internet de Rehau (2012) pour une description détaillée du produit.

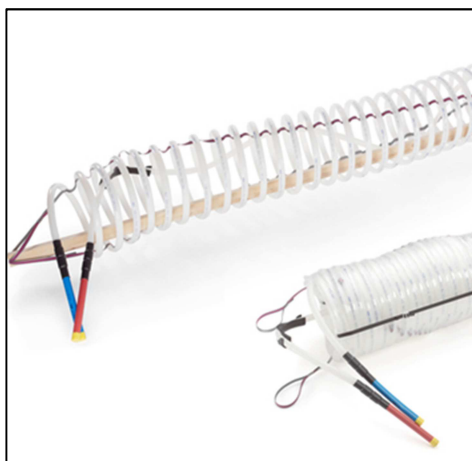


Figure 1.8 : Corbeilles géothermiques RAUGEO HELIX PE-Xa (Tirée de Rehau, 2012)

1.5.2.2 Corbeilles géothermiques BetaTherm

Les corbeilles proposées par BetaTherm ont une forme de cône tronqué. Ces sondes sont généralement enterrées entre 1 et 4 m de profondeur dans des trous remplis d'eau et de déblais tels qu'illustré à la figure 1.9. Ce produit occupe jusqu'à 60% moins d'espace qu'un collecteur horizontal répondant aux mêmes besoins. Pour une résidence d'environ 120 à 160 m² de surface de 6 à 9 corbeilles sont généralement requises. La puissance thermique garantie à 1800 h de fonctionnement équivalent à pleine charge par année est de 0,7 à 1,0 kW par corbeille BASIC, 1,1 à 1,5 kW par corbeille ECO et 1,6 à 2,0 kW par corbeille MAXI. Le lecteur est référé au manuel de référence des corbeilles géothermiques BetaTherm (2012) pour une description détaillée du produit.

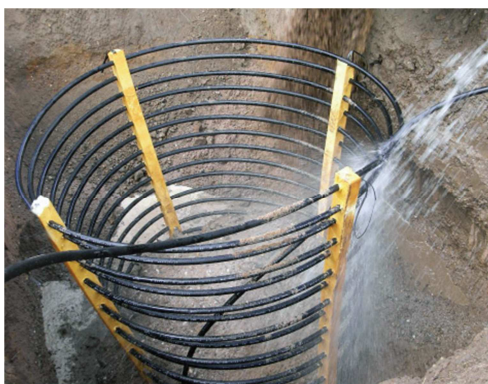


Figure 1.9 : Corbeilles géothermiques BetaTherm (Tirée de BetaTherm, 2012)

1.5.3 Capteurs IVT

Les capteurs IVT sont développés par un manufacturier suédois et formés de 18 tubes de 40 mm de diamètre raccordés en série tel qu'illustré à la figure 1.10. La section tubulaire horizontale reliant deux sections verticales est de 8 cm de longueur. Chaque module de 18 tubes mesure 1.5 m de largeur et 2 m de hauteur. Ceux-ci sont généralement placés dans des tranchées d'environ 3 mètres de profondeur espacées d'au moins 3 mètres. Pour une installation verticale, le manufacturier suggère d'installer un nombre de modules équivalent à la capacité nominale de la PAC (en kW) multipliée par un facteur de 3,5.

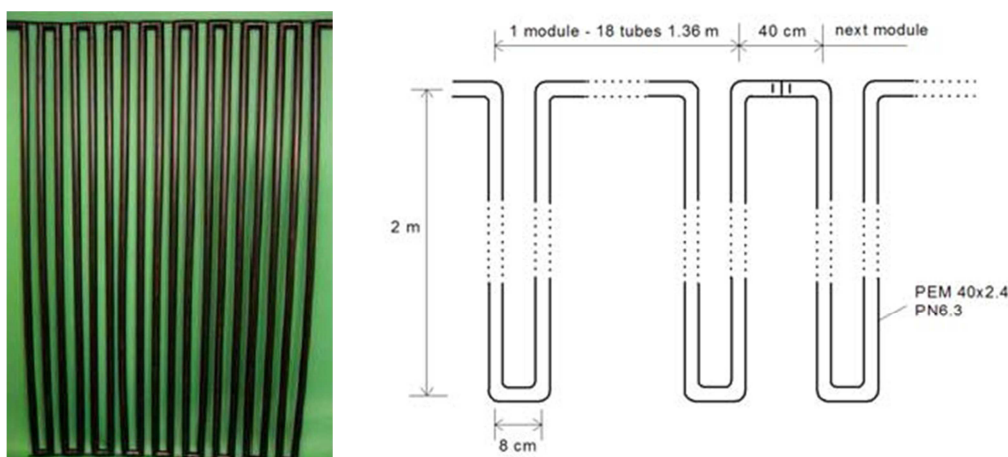


Figure 1.10 : Capteurs IVT (Tirée de Cauret et Bernier, 2009)

Une installation munie de 32 capteurs IVT a été évaluée sur la plate-forme Climat naturel présentée au chapitre 3 du présent mémoire. La configuration 4×8 utilisée est présentée à la figure 1.11. L'expérimentation menée par Cauret et Bernier (2009) consiste à utiliser la plate-forme Climat naturel afin de simuler le comportement thermique d'une maison de 150 m^2 avec un niveau d'isolation correspondant à une maison française des années 80 à l'aide d'une pompe à chaleur d'une capacité nominale de 9 kW.

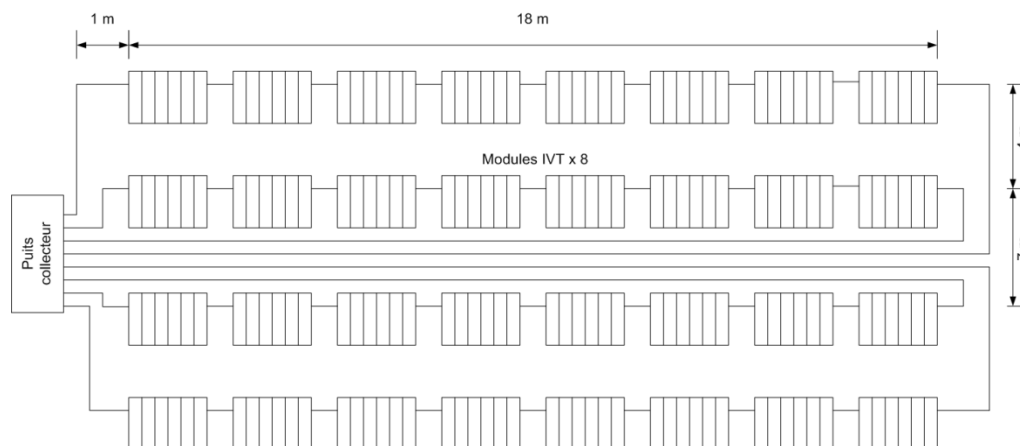


Figure 1.11 : Représentation schématique du montage expérimental de l'étude de Cauret & Bernier (2009)

Cauret et Bernier (2009) valident expérimentalement un modèle de collecteur géothermique compact IVT illustré à la figure 1.10. La longueur totale de tubes installée équivaut à 1152 m et le débit de circulation est de 0,6 L/s. L'ensemble du champ a été modélisé en utilisant le concept des *g-functions* en faisant appel au modèle de la ligne source finie et en appliquant une superposition spatiale et temporelle afin de tenir compte des interactions thermiques entre chaque tube et de la variation de la charge et de la température du sol respectivement. Le modèle prédit une température du fluide entre 1 et 4°C supérieure aux mesures expérimentales tout en respectant l'allure de la courbe expérimentale. L'étude conclue que le modèle peut être utilisé avec confiance.

1.6 Effets de surface

Les effets de surface représentent un volet important de l'étude des systèmes géothermiques de faible profondeur. Les effets de surface sont l'ensemble des phénomènes météorologiques et physiques ayant un impact sur le transfert de chaleur prenant place dans les premiers mètres sous la surface du sol. Parmi ces phénomènes on retrouve entre autres la radiation solaire (reçue par le sol et émise du sol vers le ciel), le transfert thermique convectif à la surface du sol, l'évapotranspiration (soit la perte d'eau vers la surface du sol par l'évaporation d'eau du sol vers les plantes), le gel et dégel du sol, l'accumulation de neige au sol et le déplacement d'eau dans le sol.

Gonzalez (2012) mène une étude expérimentale analysant les interactions entre le sol, les conditions extérieures environnantes et un échangeur géothermique horizontal, installé à une profondeur de 1 m, couplé à une pompe à chaleur. Les résultats montrent que l'échangeur géothermique entraîne une diminution de la température du sol l'entourant et du taux d'humidité du sol par rapport au profil de référence, ce qui peut modifier les performances de la pompe à chaleur. De plus, l'échangeur géothermique modifie les propriétés du sol l'entourant. Il est donc essentiel de bien comprendre les effets de surface afin d'optimiser le dimensionnement des systèmes de faible profondeur.

Duan (2008) présente une analyse numérique et expérimentale de la conduction de chaleur transitoire entre une source linéique et un milieu semi-infini afin d'étudier les effets du gel et dégel du sol entourant les fondations des structures dans les climats très froids. L'analyse expérimentale consiste à étudier la réponse thermique pour un apport de chaleur constant et sinusoïdal. Les résultats mesurés présentent une bonne corrélation avec les modèles analytiques. Cette étude montre qu'une structure de métal enterrée engendre une augmentation de la température du sol en été et une diminution de la température du sol en hiver.

D'autre part, tel que présenté dans l'article de Xing et al. (2011), plusieurs autres modèles tenant compte d'un ou de plusieurs de ces phénomènes ont été développés tout en maintenant des temps de calculs raisonnables. Le lecteur est référé aux ouvrages de Metz (1983), Mei (1986), Tarnawski & Leong (1993), Piechowski (1996), Esen et al. (2007) et Demir et al. (2009) pour plus de détails concernant ces modèles.

L'article de Xing et al. (2011) porte sur un modèle numérique d'échangeurs horizontaux autour de la fondation d'une résidence (*Foundation Heat Exchanger*), validé expérimentalement, et tenant compte des phénomènes radiatifs, convectifs et de l'évapotranspiration à la surface du sol. Cet article relève quelques conclusions à retenir dans le cadre du présent travail de recherche. En effet, on explique qu'en hiver la pelouse est en état de dormance et donc que très peu d'eau est perdue par évapotranspiration au cours de cette période et, conséquemment, que très peu de pertes de chaleur associées à ce phénomène sont notées. Comme le présent projet de maîtrise étudie un système géothermique en période de chauffage, où pour la majorité de la période la pelouse est en dormance, l'évapotranspiration a été négligée dans cette étude.

De plus, durant le printemps et l'été, lors de la période de croissance des plantes, l'humidité du sol est acheminée vers la surface et évacuée dans l'atmosphère. Ainsi, le sol est plus sec en été qu'en hiver. Pour tenir compte de ce phénomène, Xing et al. (2011) modélisent les échangeurs horizontaux en utilisant une conductivité constante tout au long de l'année, mais en ajustant la valeur de la diffusivité thermique du sol selon la teneur en eau du sol au cours des saisons. La comparaison avec les résultats expérimentaux montrent que cela améliore la précision du modèle. En période de chauffage (sol plus humide), la diffusivité thermique du sol utilisée dans la modélisation devrait donc être plus faible qu'en période de climatisation (sol plus sec).

Xing et al. (2011) n'ont pas pu valider l'impact du gel et dégel du sol sur le transfert thermique dans le sol puisque le climat modéré où est localisée leur installation expérimentale ne permettait pas de vérifier ces phénomènes. Pour la même raison, l'impact de la couverture de neige au sol n'a pas été modélisé dans leurs travaux.

1.7 Résumé du chapitre

La revue de la littérature a permis de mettre en lumière différents aspects clés relatifs à la géothermie de faible profondeur. D'abord, certaines méthodes de modélisation ont été présentées. Les modèles numériques n'ont pas été considérés en raison du temps de calcul trop important pour la simulation de l'expérimentation réalisée dans le cadre de ce travail, soit une saison de chauffage complète simulée avec un pas de temps horaire. Ainsi, la méthode analytique de la ligne source finie, permettant de calculer le transfert de chaleur 2D, radialement et axialement, est retenue pour le modèle développé et présenté au prochain chapitre. Ensuite, certains échangeurs de faible profondeur commercialisés sont présentés, mais les problèmes techniques existants justifient la recherche de nouvelles géométries et méthodes de construction d'échangeurs géothermiques de faible profondeur. Par exemple, les corbeilles géothermiques sont sujettes à un problème d'interférence thermique entre les tubes spiralés, ce qui abaisse les performances de cet échangeur. D'autre part, l'installation des capteurs IVT nécessitent l'excavation d'une grande quantité de terre. Cela rend la construction problématique et peu pratique, d'où l'intérêt d'étudier la possibilité d'installer des puits forés par de petites foreuses verticales peu intrusives. Finalement, certains effets de surface et modèles liés à ceux-ci sont présentés. Afin de simplifier le travail de modélisation, ces modèles ne sont pas intégrés au modèle présenté au chapitre 2, mais il serait pertinent de considérer leur intégration lors de travaux futurs.

CHAPITRE 2 MODÉLISATION

2.1 Introduction

Ce chapitre, basé sur les travaux de maîtrise de Simon Chapuis (2009), présente un modèle de puits géothermique exploitable dans l'environnement de simulation TRNSYS et appelé TRNFLS. Ce modèle a été amélioré par l'auteur de ce mémoire notamment au niveau de la correction de certains calculs proposés par Simon Chapuis (présentés à l'Annexe 1) ainsi que dans la génération de nouveaux cas de validation et d'application du modèle TRNFLS. Dans un deuxième temps, la section 2.3 présente le TYPE 273, une version améliorée du modèle TRNFLS qui prend en compte la variation réelle de la température non-perturbée du sol.

2.2 Extension des travaux de Chapuis

Le modèle TRNFLS (retrouvé sous le nom de TYPE272 dans les travaux de Chapuis) permet de simuler le comportement thermique d'un champ de puits géothermiques. Ce modèle est basé sur la méthode de la ligne source finie combinée avec la superposition spatiale et temporelle ainsi que l'agrégation des charges. Deux avantages permettent de distinguer le modèle TRNFLS des modèles classiques comme le modèle DST (Hellström, 1989) et les *g-function* d'Eskilson (1987). Premièrement, la position des puits est définie par l'utilisateur et n'est pas limitée à une configuration rectangulaire ou axisymétrique. Deuxièmement, le modèle peut traiter deux réseaux de puits indépendants (*Charge* et *Discharge*) possédant chacun sa température et son débit d'entrée et dont l'influence thermique d'un réseau sur l'autre est considérée.

La revue de la littérature ainsi que la description mathématique du modèle TRNFLS sont essentiellement issus des travaux de Chapuis et ne seront pas reproduits dans ce chapitre. Par contre, trois cas de validation et un cas d'application sont présentés ci-dessous. Le premier cas est une reproduction d'un cas de validation issu d'Oklahoma State University réalisé par Spitler et al. (2009). Le deuxième cas compare la température du fluide à la sortie d'un puits de faible profondeur calculée par le modèle DST et TRNFLS. Le troisième cas de validation présente une comparaison des températures calculées par le modèle TRNFLS et les *g-functions* d'Eskilson pour une configuration de champ géothermique 6 x 6. Finalement, le cas d'application discute d'un scénario inspiré d'un cas réel présenté dans la section *Application* du mémoire de Simon Chapuis (Chapuis, 2009). Il s'agit de l'analyse des résultats générés par TRNFLS lors d'une

simulation d'un champ de 25 puits géothermiques en configuration carrée où les 16 puits en périphérie sont connectés à une pompe à chaleur pour chauffer ou climatiser un bâtiment et les 9 puits du centre sont connectés à 200 m² de panneaux solaires afin de permettre la recharge solaire du champ géothermique.

2.2.1 Cas de validation no.1

Le premier cas compare les données générées par le modèle TRNFLS aux données expérimentales d'un système géothermique formé de trois puits connectés en parallèle, espacés de 6,1 m, opérés en chauffage et climatisation et avec des charges variant entre -2 100 à 5 700 W. Les données expérimentales ont été collectées sur une période de 16 mois à partir du mois de mars 2005. Le tableau 2.1 présente les paramètres imposés au modèle TRNFLS pour établir la comparaison avec les résultats expérimentaux.

Tableau 2.1 : Paramètres imposés au modèle TRNFLS pour le cas no.1

Paramètre	Valeur	Unités
Nombre de puits*	3	(-)
Hauteur moyenne d'un puits*	75	M
Rayon moyen d'un puits*	0,057	M
Espacement entre les puits*	6,1	M
Température non perturbée du sol*	17,3	°C
Diffusivité thermique du sol**	$1,27 \cdot 10^{-6}$	m ² ·s ⁻¹
Débit total de fluide*	0,631	kg·s ⁻¹
Chaleur spécifique du fluide***	4 180	J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
Conductivité thermique*	2,55	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Résistance thermique du puits*	0,1622	m·K·W ⁻¹

*Valeur telle que présentée dans le cas no.1, ** Valeur calculée, ***Valeur estimée

La figure 2.1 montre l'évolution de la température moyenne mensuelle du fluide à la sortie des trois puits entre le mois de mars 2005 (mois = 3) et le mois de juin 2006 (mois = 18). L'écart entre les données expérimentales et celles calculées par le modèle proposé se traduit par une valeur RMS de 0,228 °C lorsque la température du fluide à l'entrée des puits est donnée en entrée au modèle TRNFLS. Le modèle TRNFLS donne donc des résultats qui se comparent très avantageusement avec ces données expérimentales.

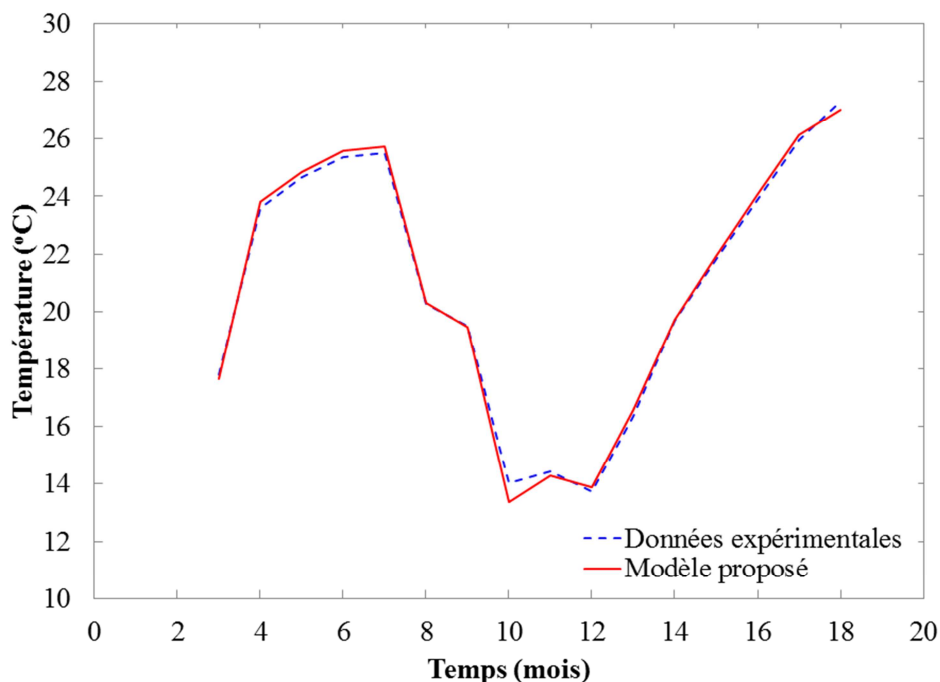


Figure 2.1: Évolution de la température moyenne mensuelle du fluide à la sortie des trois puits entre le mois de mars 2005 et juin 2006

2.2.2 Cas de validation no.2

Le deuxième cas compare les résultats issus des modèles DST et TRNFLS pour une simulation de 10 ans pour un puits de 10 m de profondeur et dont la tête est enterrée à 1 m sous la surface. Le puits est soumis à une variation sinusoïdale de la température du fluide à l'entrée entre 0 et 35°C. Le tableau 2.2 présente les paramètres de la simulation avec le modèle DST pour le cas no.2. Le tableau 2.3 présente les paramètres utilisés pour le modèle TRNFLS pour le cas no. 2 mais aussi pour le cas no.3 et le cas d'application (à venir).

Tableau 2.2 : Paramètres du modèle DST pour le cas no.2

Paramètre	Valeur	Unités
Volume de stockage	1000	m ³
Profondeur du puits	11	m
Profondeur d'enfouissement de la tête du puits	1	m
Nombre de puits	1	-
Rayon du puits	0,05	m
Nombre de puits en série	1	-
Nombre de régions radiales	1	-
Nombre de régions verticales	10	-
Conductivité thermique du volume de stockage	7,2	$\text{kJ}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité thermique du volume de stockage	2000	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
Résistance fluide-sol	0,0278	$\text{hr}\cdot\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{kJ}^{-1}$
Négatif de la résistance entre les tuyaux	0	$\text{hr}\cdot\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{kJ}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide	4,2	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Masse volumique du fluide	1000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Indicateur d'isolation	0	-
Fraction de la hauteur d'isolation	0,5	-
Épaisseur d'isolation	0,0254	m
Conductivité thermique de l'isolation	1	$\text{kJ}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Nombre d'années de simulation	10	-
Température maximale du volume de stockage	100	C
Température initiale de la surface du volume de stockage	10	C
Gradient thermique initial du volume de stockage	0	-
Nombre d'années de préchauffage	0	-
Température maximale de préchauffage	30	C
Température minimale de préchauffage	10	C
Déphasage de la période de préchauffage	90	day
Température moyenne de l'air – années de préchauffage	10	C
Amplitude de la température de l'air – années de préchauffage	10	deltaC
Déphasage de la température de l'air – années de préchauffage	0	day
Nombre de couches de sol	1	-
Conductivité thermique de la couche de sol	7,2	$\text{kJ}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité thermique de la couche de sol	2000	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
Épaisseur de la couche	1000	m

Tableau 2.3 : Paramètres utilisés dans les simulations utilisant le modèle TRNFLS

Paramètre	Valeur			Unités
	Cas no.2	Cas no.3	Application	
Température non perturbée du sol	10	0	10,8	C
Conductivité thermique du sol	2	2,315	2,39	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Chaleur spécifique du sol	1000	1000	1434	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Densité du sol	2000	1000	2000	$kg \cdot m^{-3}$
Hauteur d'un puits	10	100	146	m
Profondeur d'enfouissement de la tête du puits	1	4	1	m
Rayon du puits	0,05	0,05	0,05	m
Résistance thermique du puits	0,1	0,000001	0,1	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide	4200	4200	4190	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Demi-amplitude de la variation de la température à la surface	10	0	0	deltaC
Déphasage annuel de la température à la surface	0	0	0	day
Charge – Nombre de puits	1	18	16	-
Charge – Nombre de branches	1	18	16	-
Charge – Nombre de puits par branche	1	1	1	-
Charge – Fraction du débit par branche	1	1/18	1/16	-
Discharge – Nombre de puits	0	18	9	-
Discharge – Nombre de branches	0	18	9	-
Discharge – Nombre de puits par branche	0	1	1	-
Discharge – Fraction du débit par branche	0	1/18	1/9	-
MLAA – Nombre de pas de temps non agrégés	24	24	24	-
MLAA – 1ère période d'agrégation	48	48	48	-
MLAA – 2e période d'agrégation	168	168	168	-
MLAA – 3e période d'agrégation	360	360	360	-
Nombre de puits à inclure en sorties du modèle	0	0	25	-
Type de données de sorties pour ces puits	0	1	1	-
Nombre de nœuds additionnels	0	0	113	-
Numéro d'unité pour le fichier d'entrée	11	11	11	-
Facteur de convergence	0,005	0,005	0,005	-

La figure 2.2 présente la variation de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits calculée par les modèles DST et TRNFLS. Il est à noter que les deux courbes nommées « Tout DST » et « Tout TRNFLS » sont confondues. La figure 2.3 illustre l'écart entre les valeurs calculées par les deux modèles. L'écart maximum entre les deux modèles est de 0,324°C et la valeur RMS est de 0,225°C. La valeur RMS sur la première année est de 0,147°C, soit inférieure à la valeur RMS obtenue pour la dixième année qui est de 0,240°C. Dans l'ensemble, l'accord entre les deux modèles est très bon. Le modèle TRNFLS suit très bien les sommets et les vallées prédit par le modèle DST.

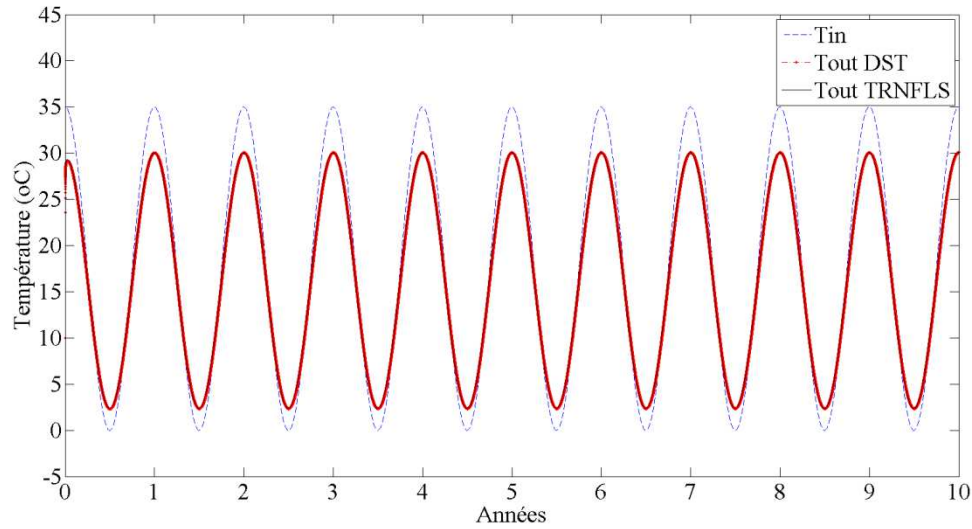


Figure 2.2 : Variation de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits calculée par les modèles DST et TRNFLS

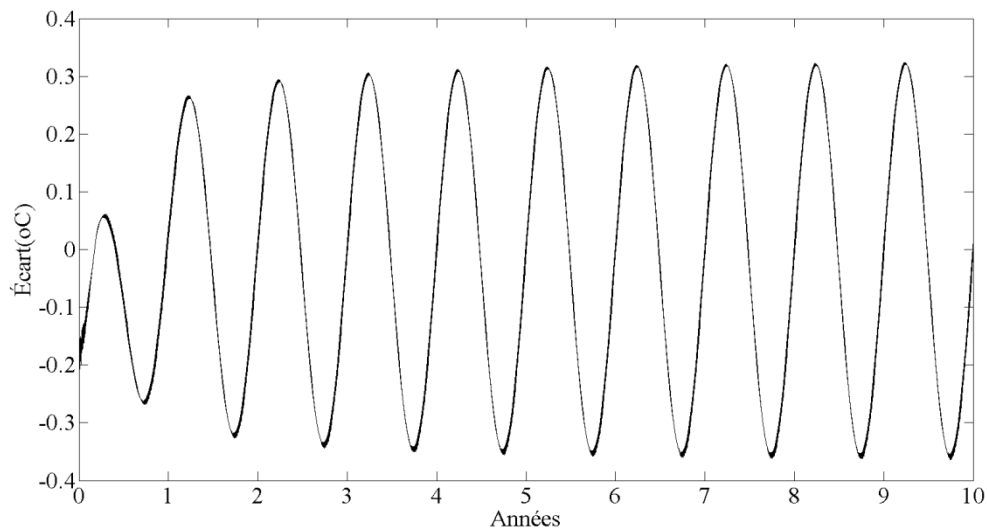


Figure 2.3 : Écart entre les valeurs calculées par les modèles DST et TRNFLS

2.2.3 Cas de validation no.3

Le troisième cas présente les résultats d'une comparaison entre la température à la paroi des puits pour un champ de 36 puits (6×6) de 100 m de profondeur calculée au moyen de TRNFLS et des *g-functions* d'Eskilson. Tel que présenté à l'équation 1.11, les *g-functions* évaluent la température à la paroi des puits d'un champ donné en fonction de la conductivité thermique du

sol, du taux de transfert de chaleur, d'un ratio temporel, du ratio entre le rayon et la hauteur d'un puits, du ratio entre l'espacement des puits et leur hauteur ainsi que de la configuration du champ.

Dans ce qui suit la valeur de T_g est fixée à 0°C et celle du ratio $q/2\pi k$ à 1 ($k=2,315$ W/mK et $q = 14,55$ W/m). Ceci fait en sorte que T_b est directement égale à la valeur de la *g-function* ce qui facilite les comparaisons avec les valeurs de T_b calculées par le modèle TRNFLS.

Pour le modèle TRNFLS, un très grand débit (environ 2 L/s par puits) et une très faible résistance thermique du puits sont imposés afin que la valeur de la température moyenne du fluide dans le puits puisse être considérée comme étant égale à la température à la paroi du puits (T_b). Un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur de 14,55 W/m est également utilisé ce qui équivaut à une puissance injectée de 52,4 kW pour 36 puits.

Puisque le taux de transfert de chaleur total et le débit de fluide sont connus, il est possible d'évaluer la température du fluide à l'entrée du champ en résolvant l'équation 2.4 pour T_{in} .

$$Q_{total} = \dot{m} \times C_p \times (T_{in} - T_{out}) \quad (2.4)$$

où

Q_{total} est le taux de transfert de chaleur total (W)

\dot{m} est le débit de fluide alimentant le champ de puits (kg s^{-1})

C_p est la chaleur spécifique du fluide ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T_{in} est la température du fluide à l'entrée de chaque puits (°C)

T_{out} est la température du fluide à la sortie des puits (°C)

La valeur de T_{in} est évaluée à chaque pas de temps, car la valeur de T_{out} évolue dans le temps. Il est à noter que la température du fluide à l'entrée d'un puits est la même pour les 36 puits étant donné qu'ils sont connectés en parallèle dans le modèle TRNFLS.

La simulation est réalisée sur une période de 20 ans par intervalles de 2 heures. Le tableau 2.3, présenté à la section précédente, affiche les paramètres d'entrées au modèle TRNFLS.

La figure 2.4 présente la comparaison entre la température calculée par les *g-functions* d'Eskilson et le modèle TRNFLS. Il est possible de remarquer que le modèle TRNFLS se compare favorablement aux *g-function* jusqu'à environ 20 000 heures. Après ce temps les deux

modèles commencent à diverger. Ceci s'explique par le fait que le modèle TRNFLS impose un taux de transfert de chaleur constant sur la hauteur de chaque puits. Or, comme le souligne Cimmino et al. (2012), le taux de transfert de chaleur varie selon la hauteur du puits après quelques années. Ce phénomène est pris en compte par les *g-functions* mais pas par le modèle TRNFLS.

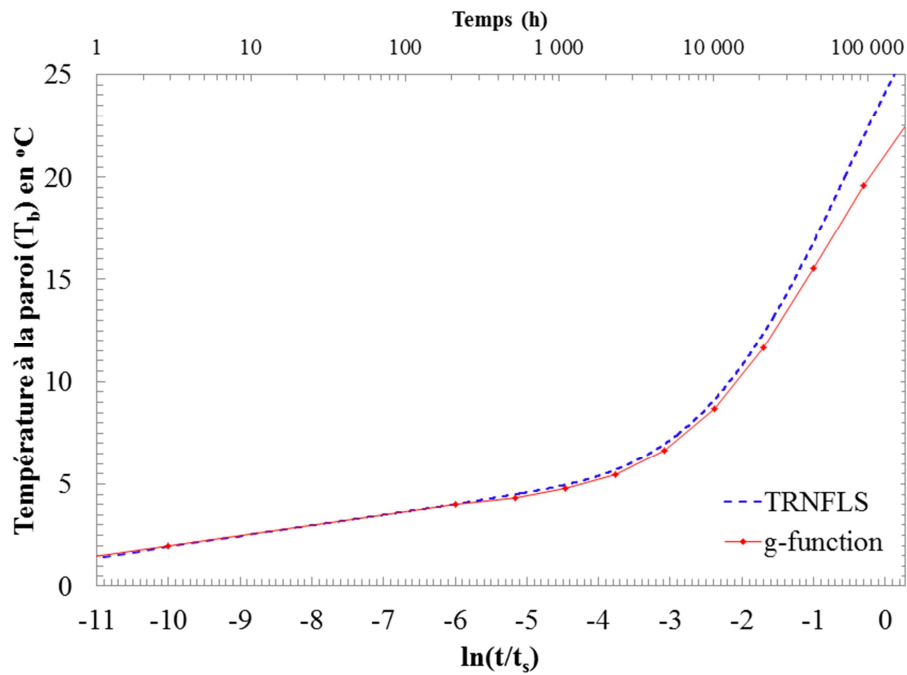


Figure 2.4 : Comparaison entre la température calculée par les *g-functions* d'Eskilson et le modèle TRNFLS

2.2.4 Cas d'application

Cette section présente un cas d'application du modèle TNSFLS. Celui-ci est inspiré d'un cas réel présenté dans la section *Application* du mémoire de Simon Chapuis (Chapuis, 2009). L'échangeur géothermique proposé, dont les caractéristiques sont présentées au tableau 2.3, est formé de 25 puits uniformément espacés de 8 mètres et positionnés selon la configuration présentée à la figure 2.5. Les 25 puits sont séparés en deux réseaux (configuration nommée 9/16), soit un réseau regroupant les 16 puits en périphérie qui sont liés à un réseau de pompes à chaleur alimentant un bâtiment en chauffage et climatisation et un second réseau regroupant les 9 puits du centre du champ qui sont liés, en tout temps, à 200 m² de capteurs solaires.

Le rendement des capteurs solaires s'exprime par l'équation suivante :

$$\eta_{\text{capteur}} = 0,693 - 3,835 \frac{(T_{f,in} - T_{ext})}{G} \quad (2.5)$$

Où

η_{capteur} est le rendement des capteurs solaires (-)

$T_{f,in}$ est la température du fluide à l'entrée du collecteur (°C)

T_{ext} est la température de l'air ambiant (°C)

G est le rayonnement solaire incident (Wm^{-2})

Il est à noter que tous les puits de chacun des réseaux sont connectés en parallèle. La simulation est réalisée sur une période de 10 ans avec une année de préchauffage des 9 puits du centre suivie de 9 ans d'opération normale des 16 puits en périphérie et du chauffage des 9 puits du centre.

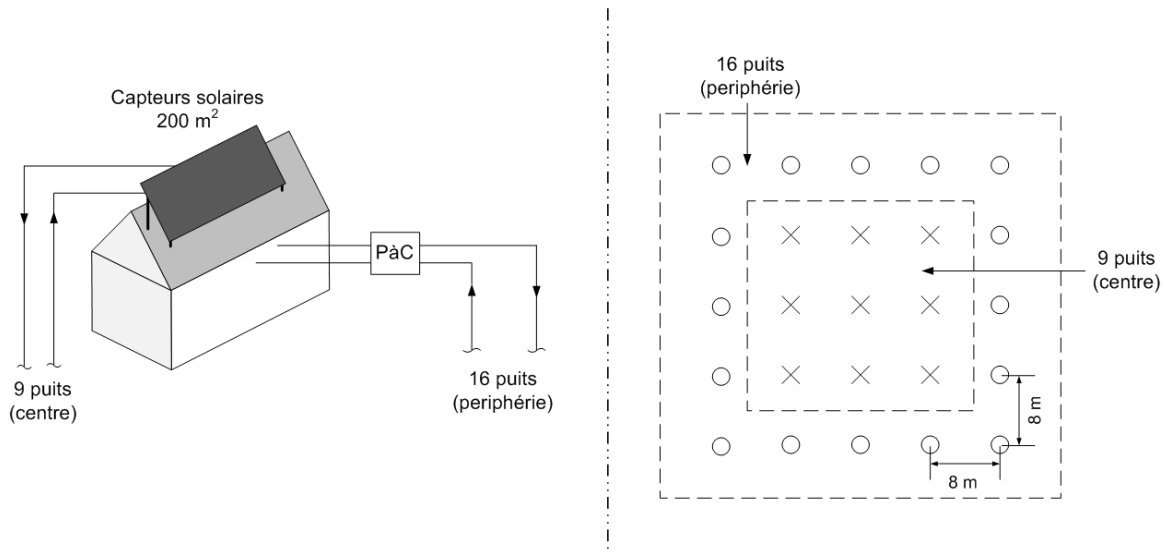


Figure 2.5 : Installation de recharge solaire du sol (gauche) et vue du dessus des 2 réseaux de puits indépendants en configuration 9/16 (droite)

L'étude de ce système permet d'évaluer s'il est possible de recharger thermiquement le sol afin de permettre l'opération des pompes à chaleur dans les plages de température prévue durant 10 ans ainsi que d'étudier la propagation du front thermique provenant des puits du centre au cours des années.

2.2.4.1 Modèle d'échangeur géothermique

Le système proposé est modélisé avec le modèle TRNFLS dans l'environnement de simulation TRNSYS. Selon la configuration 9/16, le modèle d'échangeur géothermique doit tenir compte de deux réseaux indépendants de puits possédant chacun des conditions d'entrée qui leur sont propres (température et débit du fluide caloporteur). Le modèle doit également tenir compte de la position de chacun des puits afin d'évaluer l'interaction thermique entre eux.

2.2.4.2 Charges de chauffage et climatisation

Les charges de pointe et les charges mensuelles ont été fournies par l'ingénieur du projet alors que les charges horaires ont été générées selon la méthode suivante. À chaque heure, l'échangeur géothermique doit continuellement satisfaire la charge mensuelle à l'exception d'une période de six heures consécutives, prenant place à la moitié de chaque mois, où la charge mensuelle est remplacée par la charge de pointe de chauffage ou climatisation dudit mois. Il est à noter que la charge de pointe de climatisation est appliquée durant le jour (simultanément au gain d'énergie solaire des 9 puits du centre) alors que la charge de pointe de chauffage est appliquée durant la nuit (aucun gain solaire). Le tableau 2.4 présente les charges de chauffage et climatisation au sol utilisées pour les simulations horaires. Ces charges au sol sont calculées en appliquant un COP de 4 aux charges du bâtiment.

En appliquant les charges mensuelles moyennes présentées au tableau 2.4, le sol présente un déséquilibre thermique annuel de 14,96 kW. Cela signifie qu'en moyenne sur une base annuelle 14,96 kW sont continuellement extraits du sol. L'injection d'énergie solaire dans le sol vise à neutraliser ce déséquilibre thermique annuel.

Tableau 2.4 : Charge de chauffage (+) et charge de climatisation (-) au sol

Mois	Pointe de climatisation (kW)	Pointe de chauffage (kW)	Charge mensuelle moyenne (kW)
Janvier	N/A	98,94	68,28
Février	N/A	98,94	70,68
Mars	N/A	98,94	29,28
Avril	N/A	98,94	12,84
Mai	-65,94	N/A	-13,02
Juin	-98,94	N/A	-24,42
Juillet	-98,94	N/A	-29,52
Août	-98,94	N/A	-26,58
Septembre	-76,92	N/A	-22,62
Octobre	N/A	98,94	14,16
Novembre	N/A	98,94	39,36
Décembre	N/A	98,94	64,68
Bilan annuel des charges mensuelles moyennes:			14,96

2.2.4.3 Résultats

Les figures 2.6 à 2.11 présentent les résultats des simulations réalisées dans l'environnement de simulation TRNSYS. Celles-ci sont réalisées en utilisant un pas de temps d'une heure sur une période de 10 ans. Bien que les figures montrent des résultats pour chaque réseau de puits, il est important de rappeler que le modèle TRNFLS permet de tenir compte de l'interaction thermique entre les 25 puits.

La figure 2.6 présente le comportement du système, sur 10 ans, sans injection solaire. Tel qu'attendu, la température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie atteint des valeurs sous 0°C dès la deuxième saison de chauffage prenant place au cours de la troisième année (puisque aucune charge de chauffage n'est appliquée la première année). L'atteinte de températures inférieures à 0°C s'explique par le fait que le sol n'est pas suffisamment thermiquement régénéré au cours du temps. De plus, le profil de température du fluide atteint des

températures de plus en plus basses durant les années subséquentes. Une température de -2°C est atteinte à la sortie des 16 puits en périphérie lors de la dixième année. Une telle température à la sortie des puits ne respecte par le critère de design de ce projet, soit de maintenir une température du fluide supérieure à 0°C en tout temps.

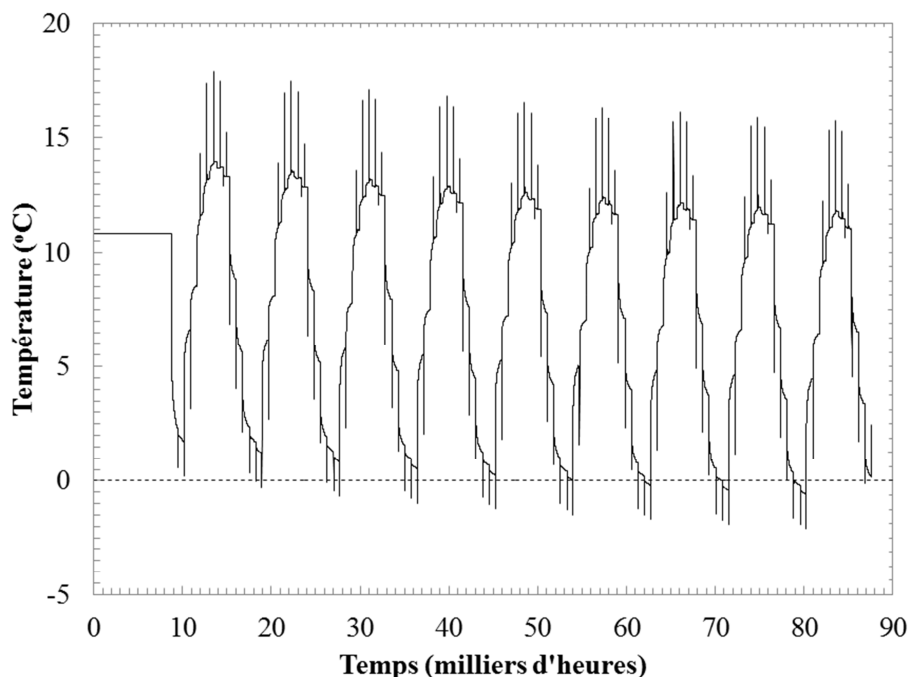


Figure 2.6 : Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie sur une période de 10 ans – aucune injection solaire

La figure 2.7 présente l'évolution de la température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie avec injection solaire. En observant cette figure, il est possible de remarquer que la température du fluide à la sortie des 16 puits demeure supérieure à 0°C en tout temps et que le minimum annuel tend à augmenter d'année en année. L'énergie solaire, captée principalement durant l'été, permet de régénérer thermiquement le sol autour des puits formant l'échangeur géothermique. Il est à noter que le gain d'énergie dans le sol ne nuit pas à l'utilisation des 16 puits en périphérie en période de climatisation. En effet, la température du fluide à la sortie de ces puits n'excède pas $19,3^{\circ}\text{C}$, ce qui est très acceptable pour l'opération d'une pompe à chaleur en mode climatisation.

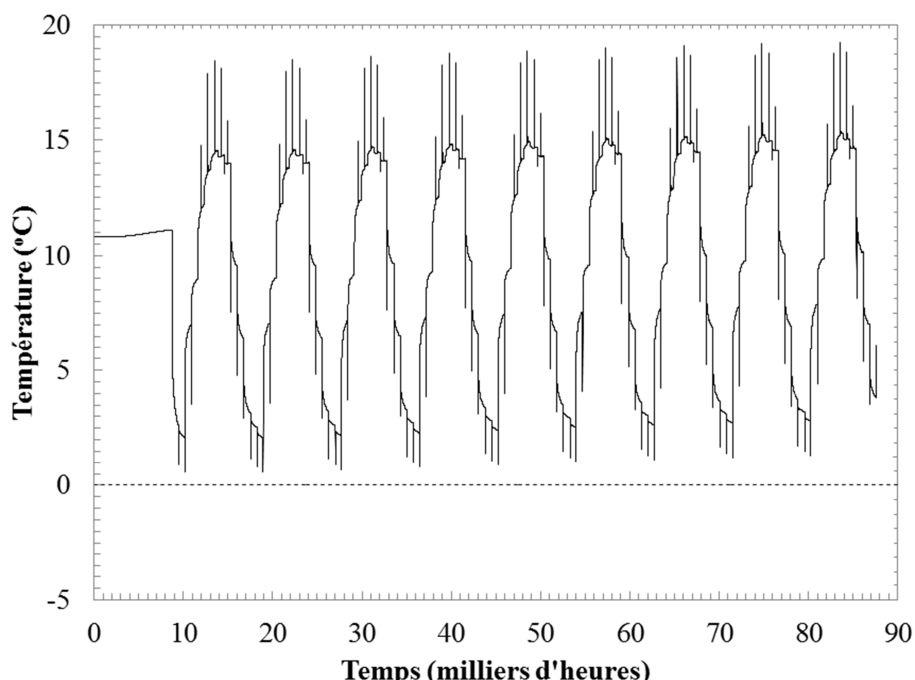


Figure 2.7 : Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie sur une période de 10 ans – avec injection solaire

La figure 2.8 présente l'évolution de la température du fluide à la sortie des 9 puits du centre avec injection solaire. En observant cette figure, il est possible de remarquer que la température du fluide à la sortie des 9 puits varie entre $10,8^{\circ}\text{C}$ et $31,9^{\circ}\text{C}$. Cette plage de température engendre une différence relativement basse entre la température du fluide à l'entrée du collecteur solaire et la température ambiante à l'extérieur. Il est à noter que l'énergie solaire injectée annuellement dans l'échangeur géothermique est de 172 MWh, c'est-à-dire une puissance annuelle moyenne de 19,6 kW. Cette valeur est proche de la valeur du déséquilibre thermique annuel déterminé précédemment, soit 14,96 kW.

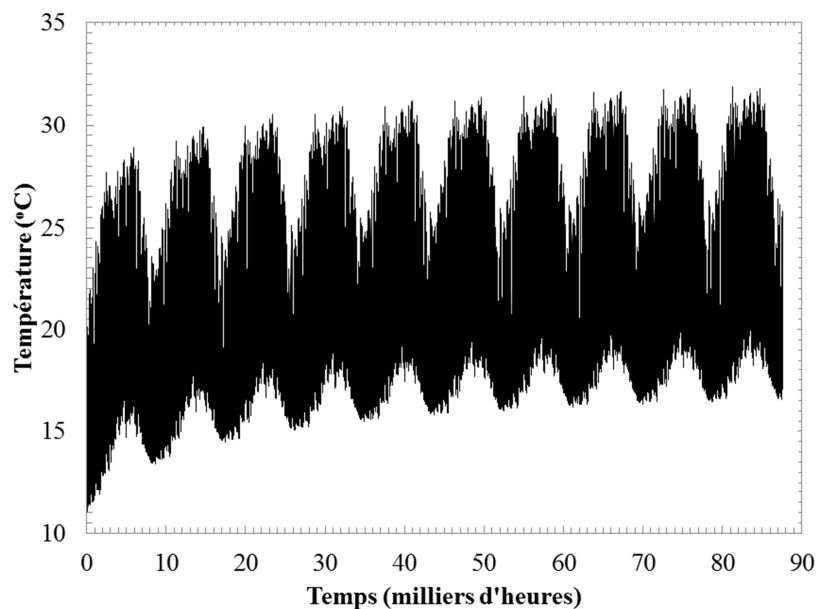


Figure 2.8 : Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre sur une période de 10 ans – avec injection solaire

La figure 2.10 présente l'état thermique du sol pour une simulation d'une heure lors de la pointe de climatisation de la deuxième année survenant le 15 juillet (à $t = 14\,231$ h). Cette figure est obtenue en ajoutant les 400 nœuds additionnels illustrés à la figure 2.9. Il est important de rappeler que la température du sol donnée par le modèle proposé correspond à une température moyenne du sol sur la hauteur d'un puits.

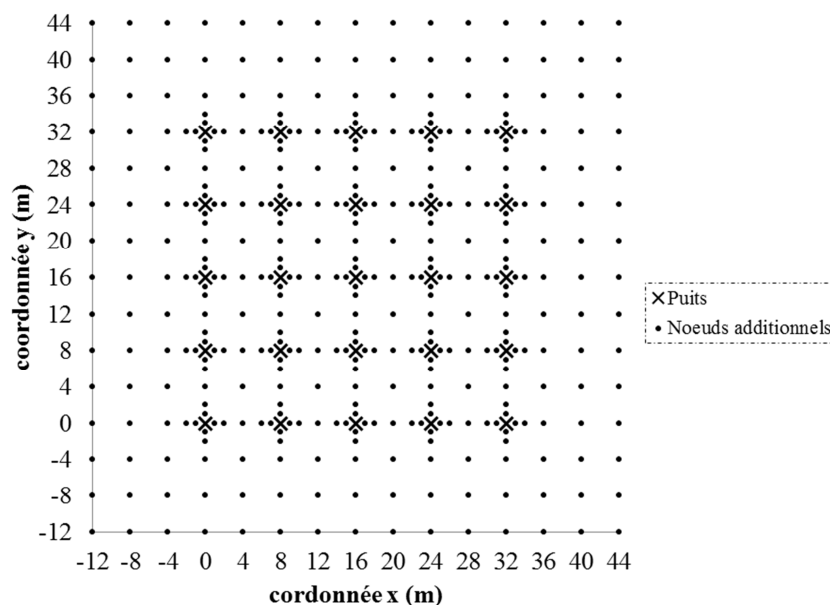


Figure 2.9 : Position des nœuds additionnels pour tracer la figure 2.10

Il est possible de remarquer qu'il y a accumulation d'énergie solaire dans le sol durant l'été puisque la température entre les puits du centre est supérieure à la température du sol non perturbé de 10,8°C.

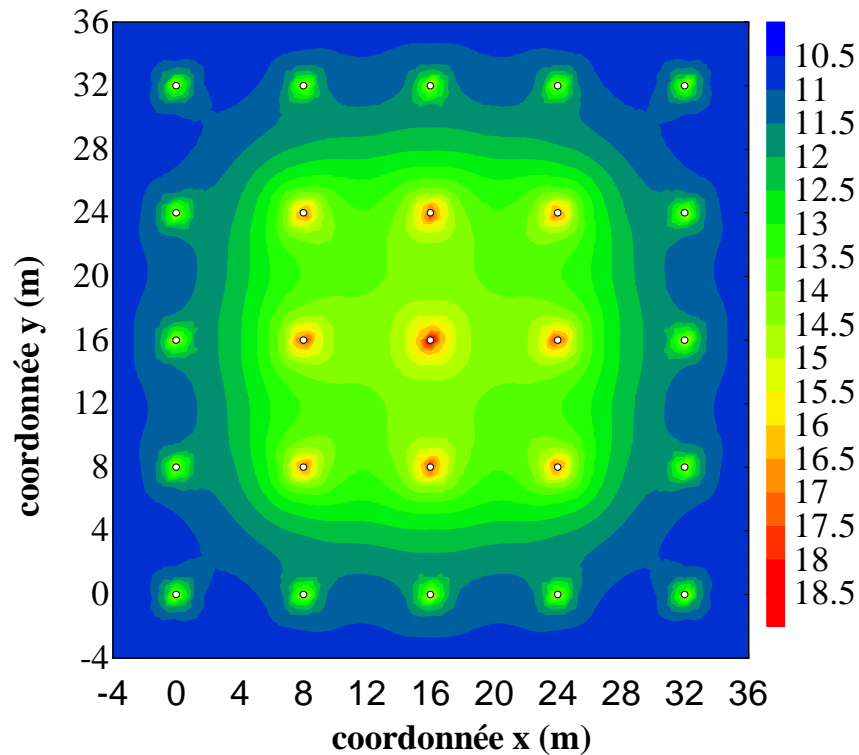


Figure 2.10 : Distribution de la température moyenne sur la hauteur d'un puits autour des 25 puits formant l'échangeur géothermique

La figure 2.11 présente la distribution de la température à la paroi des 5 puits situés sur la ligne $y=16$ m (ligne centrale du champ) ainsi que la température moyenne sur la hauteur d'un puits de 113 nœuds additionnels positionnés sur la ligne $y = 16$ m, à chaque 0,5 m entre $-12 \text{ m} < x < 44 \text{ m}$. La distribution de température est observée à quatre moments clés, soit à $t = 8\,750 \text{ h}$ (tout juste avant la fin de la première année où aucune charge n'est appliquée au bâtiment), $t = 14\,231 \text{ h}$ (Pointe de climatisation de la deuxième année), $t = 17\,510 \text{ h}$ (Mode chauffage – un an après la mesure à 8 750 h) et à $t = 87\,590 \text{ h}$ (Mode chauffage – 10 ans après la mesure à 8 750 h).

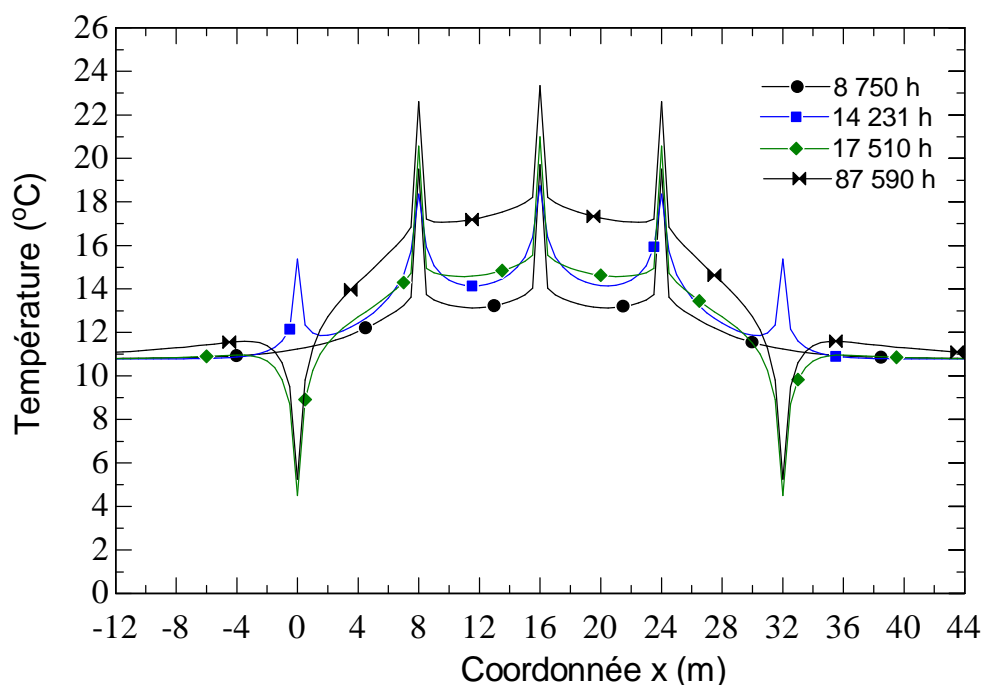


Figure 2.11 : Distribution de température des nœuds positionnés sur la ligne $y = 16$ m (ligne centrale du champ)

En observant la figure 2.11, il est possible de remarquer que la température à la paroi des trois puits liés au réseau d'injection d'énergie solaire dans le sol augmente avec le temps. Par exemple, après 8 750 h, la température de la paroi des trois puits du centre varie entre 19,50°C et 19,71°C alors qu'elle varie entre 22,61 et 23,34°C 10 ans plus tard, soit après 87 590 h d'opération. À l'opposé, la température à la paroi des deux puits faisant partie du réseau en périphérie, alimentant le bâtiment, diminue avec le temps. En effet, la température atteint 11,23°C après 8 750 h d'opération et 5,25°C 10 ans plus tard, soit après 87 590 h d'opération.

Deuxièmement, la figure 2.11 illustre le profil de température du sol attendu, c'est-à-dire une température du sol plus élevée au centre de l'échangeur géothermique où la recharge solaire a lieu. En effet, la température des trois puits du centre est supérieure à la température du sol non perturbé puisque le système injecte de la chaleur captée par les collecteurs solaires par ces puits tout au long de l'année. Lorsque le système opère en mode chauffage (voir courbes de $t = 17 510$ h et $t = 87 590$ h), les deux puits appartenant au réseau en périphérie présentent une température du sol inférieure à la température du sol non perturbé (10,8°C) puisque le système extrait de la chaleur du sol par ces puits en période de chauffage pour alimenter le bâtiment. Au contraire, lorsque le système opère en mode climatisation (voir courbe $t = 14 231$ h), les cinq puits situés

sur la ligne $y = 16$ m présentent une température au-dessus de la température du sol non perturbé puisque la chaleur extraite du bâtiment est rejetée dans les deux puits en périphérie en mode climatisation et les trois puits du centre stockent la chaleur captée par les collecteurs solaires.

2.3 Présentation du TYPE273

Le TYPE273 correspond à une version modifiée du TYPE272 développée à partir du code original créé par Simon Chapuis (Chapuis, 2009). Le TYPE273 a été développé dans le cadre du projet de maîtrise présenté dans ce mémoire en collaboration avec Matthieu Grand, étudiant de l'INSA de Lyon en stage de fin d'études à Montréal entre avril et août 2012.

La modification principale apportée au TYPE272 concerne la température du sol non perturbé. Pour rappel, le TYPE272 suppose un profil sinusoïdal de la température de l'air en surface afin de calculer le profil de température du sol selon la profondeur tel que montré à l'Annexe 1. Or dans le cas où la température de l'air ne suit pas un profil sinusoïdal idéal, mais plutôt une évolution réelle et que les puits sont peu profonds, il se peut que la température moyenne sur la hauteur du puits ne suivent pas un profil régulier tel que montré à l'Annexe 3 (voir figure A.3.1) Dans le cas du TYPE273, la moyenne de la température du sol sur la hauteur du puits est lue comme entrée au modèle. Cette température moyenne peut provenir de mesures expérimentales ou d'une évaluation comme celle réalisée à l'Annexe 3. Il est à noter que les paramètres suivants, bien que présents dans le proforma du TYPE273, ne sont pas utilisés dans le code et la valeur imposée n'a donc aucune importance :

- *Undisturbed ground temperature* (Paramètre 1)
- *Half annual amplitude of the surface temperature variation* (Paramètre 12)
- *Annual time-lag for surface temperature* (Paramètre 13)

De plus, lorsque le débit du fluide caloporteur circulant dans les puits est faible (inférieur à 0,018 kg/h – basé sur les travaux de Simon Chapuis), la température du fluide à la sortie du réseau *Charge* et *Discharge* est égalée à la température du fluide à la sortie dudit réseau au pas de temps précédent, soit juste avant que le débit devienne faible. Cette température est maintenue constante jusqu'à ce que le débit augmente à nouveau. Cela permet d'améliorer le comportement du modèle en mode de fonctionnement cyclique.

2.3.1 Validation du TYPE273

Le TYPE 273 est validé par deux cas tests. L'objectif du premier test est de montrer qu'en imposant la même température du sol à chaque pas de temps aux deux modèles, les types 272 et 273 conduisent aux mêmes résultats. Il s'agit donc de comparer la température de sortie du fluide obtenue avec les types 272 et 273 pour un même cas d'étude. Ce cas correspond au Cas no.1 présenté à la section 2.2.1. Pour ce faire, les paramètres indiqués au tableau 2.1 sont imposés au TYPE272, puis la température du sol non perturbé calculée par ce modèle est récupérée. Ensuite, les mêmes paramètres sont imposés au TYPE273 et la température du sol non perturbé récupérée du TYPE272 est imposée en entrée au TYPE273.

La figure 2.12 présente l'évolution de la température de sortie du fluide calculée par le TYPE272 et le TYPE273 sur une simulation réalisée sur une période de 18 mois (~13 175 h) et la figure 2.14 présente la différence entre la température de sortie du fluide calculée par le TYPE273 et le TYPE272. En observant les figures 2.12 et 2.13, il est possible de remarquer que les deux courbes sont confondues et que l'écart absolu entre les deux températures demeure sous $0,3^{\circ}\text{C}$. L'écart RMS entre les températures de sortie du fluide calculées par les deux modèles est de $0,03^{\circ}\text{C}$. Le TYPE273 génère donc des résultats qui se comparent très avantageusement avec ceux générés par le TYPE272.

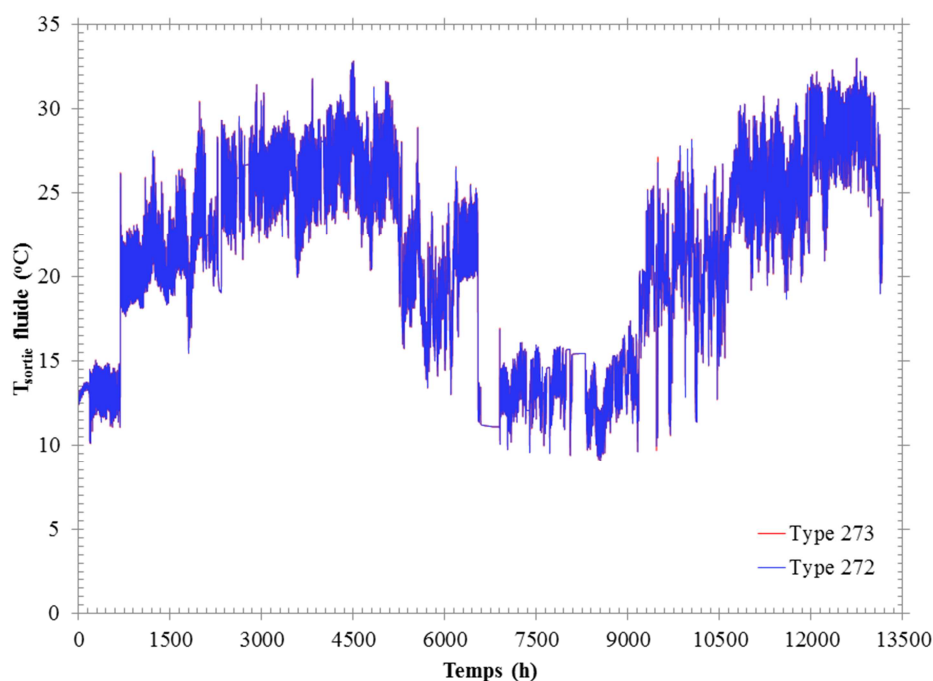


Figure 2.12 : Évolution de la température de sortie du fluide calculée par le TYPE272 et TYPE273

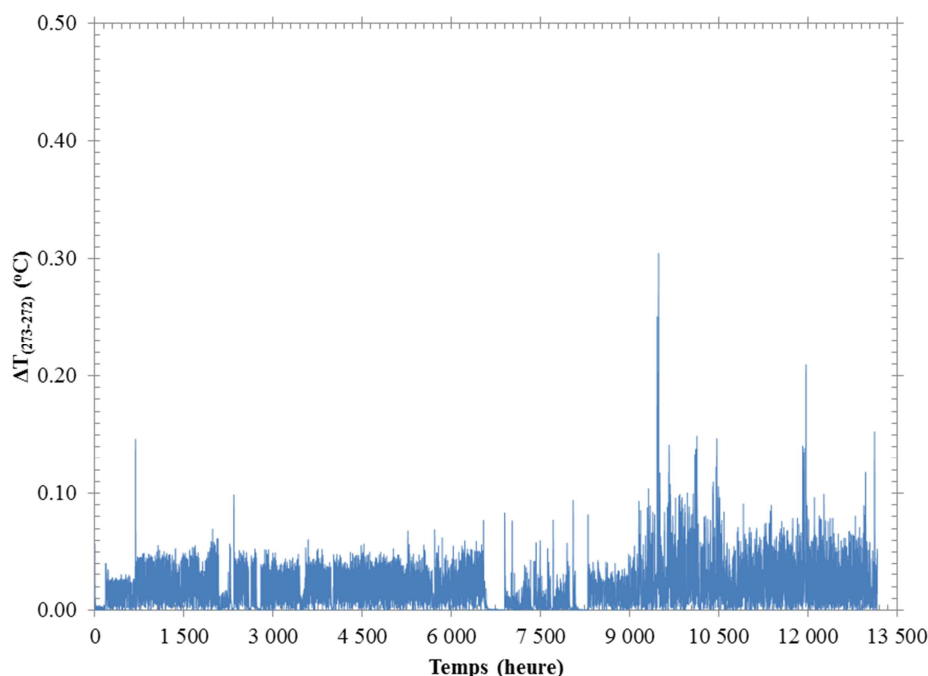


Figure 2.13 : Écart entre la température de sortie calculée par le TYPE273 et le TYPE272

Le deuxième test de validation consiste à comparer les températures de sortie du fluide calculées par le modèle DST et le TYPE273. Le cas choisi correspond au Cas no.2 présenté à la section 2.2.2. La figure 2.14 présente l'évolution de la température du fluide imposée en entrée aux deux modèles ainsi que l'évolution de la température de sortie du fluide calculée par le modèle DST et le TYPE273. Il est à noter que la simulation est réalisée sur une période de 4 ans plutôt que 10 ans, tel que présenté à la section 2.2.2, afin de réduire le temps de calcul. La figure 2.15 présente la différence entre la température de sortie du fluide calculée par le TYPE273 et le modèle DST. Il est à noter qu'afin de définir un profil de température sur la profondeur du puits, une période d'initialisation a été modélisée pour le modèle DST. Pour ce faire, la simulation a été réalisée pendant 10 ans à débit nul et ensuite pendant 4 ans avec débit.

En observant les figures 2.14 et 2.15, il est possible de remarquer que les deux courbes sont confondues et que l'écart absolu entre les deux températures demeure sous 0,35°C. De plus, l'écart RMS entre les températures de sortie du fluide calculées par les deux modèles est de 0,21°C. Ce cas de validation montre que le TYPE273 génère des résultats qui se comparent favorablement avec ceux générés par le modèle DST. Les deux cas présentés montrent que les résultats du TYPE273 s'approchent de ceux du modèle DST, modèle qui est souvent considéré

comme une référence dans le domaine. Le TYPE 273 peut donc être utilisé avec confiance et il sera utilisé pour la comparaison avec les résultats expérimentaux recueillis dans le cadre de cette étude.

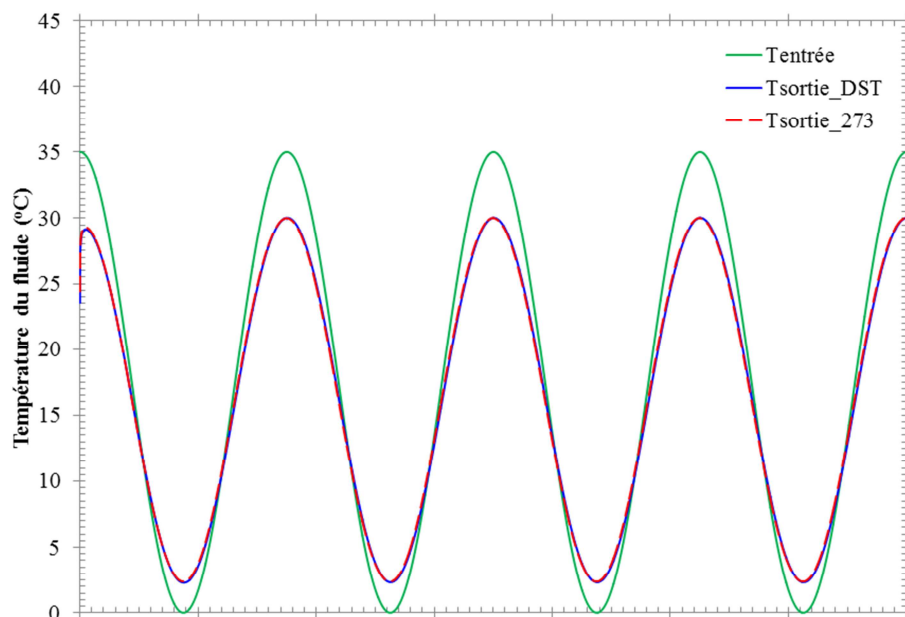


Figure 2.14 : Évolution de la température imposée en entrée aux deux modèles et de la température de sortie du fluide calculée par le modèle DST et le TYPE 273

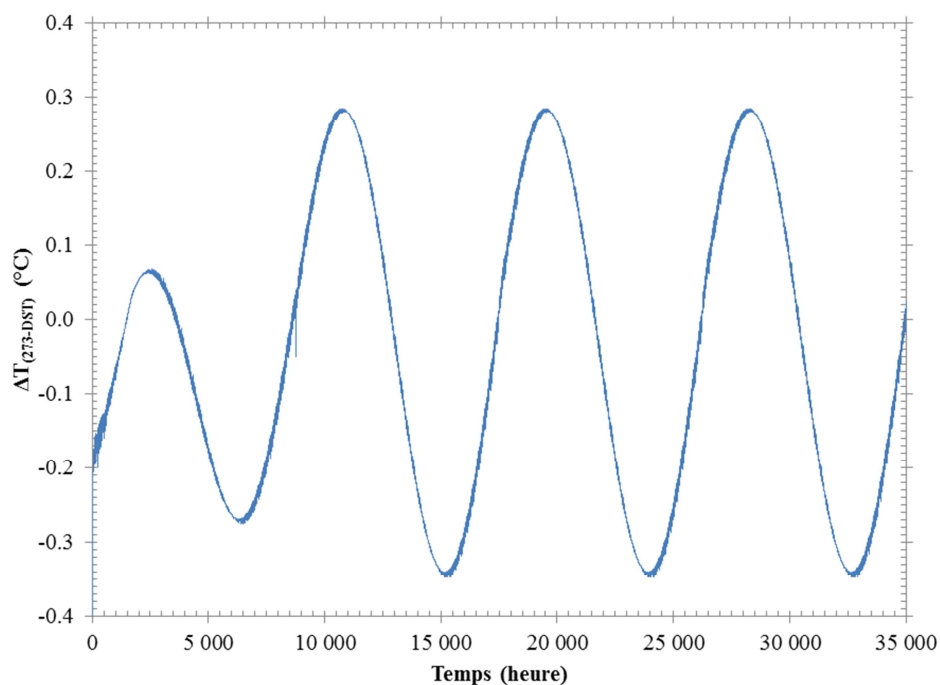


Figure 2.15 : Écart entre la température de sortie calculée par le modèle DST et le TYPE 273

2.4 Résumé du chapitre

Le modèle TRNFLS développé par Simon Chapuis constitue donc un bon point de départ pour la modélisation du site expérimental étudié dans ce travail. L'intérêt particulier de ce modèle réside dans le fait qu'il est possible de positionner arbitrairement les puits géothermiques et de modéliser deux réseaux de puits indépendants. En effet, ces deux caractéristiques permettent une flexibilité de modélisation intéressante et le modèle TRNFLS a donc été utilisé afin de tester différentes configurations de système géothermique préalablement à la construction afin de déterminer la configuration optimale présentée au prochain chapitre. Toutefois, certaines hypothèses intégrées au modèle TRNFLS ont nécessité l'ajustement de ce modèle afin d'être applicable aux puits de faible profondeur et, tel que les cas de validation le montrent, ce modèle peut être utilisé avec confiance pour la comparaison avec les résultats expérimentaux présentés au chapitre 5.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

3.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la description du montage expérimental. D'abord, la localisation du site est présentée suivie de la présentation de la technique de forage utilisée. Ensuite, la description du champ géothermique est abordée. Cette section expose la géométrie du champ et des puits, le type de raccordement entre les puits ainsi que les caractéristiques et propriétés des tubes, du coulis et du fluide caloporteur. Par la suite, l'instrumentation du montage expérimental est décrite et certains des problèmes rencontrés sont décrits. Le chapitre se termine par une description de la plate-forme de climat naturel qui reproduit l'opération réelle d'une pompe à chaleur.

3.2 Localisation du site expérimental

Le site expérimental est situé au centre de recherche d'Électricité de France (EDF) sur le site des Renardières à Moret-sur-Loing, France. La figure 3.1 présente l'emplacement du site sur une carte tirée de Google Maps. Le champ de puits est situé près de la plate-forme de *climat naturel* de EDF.

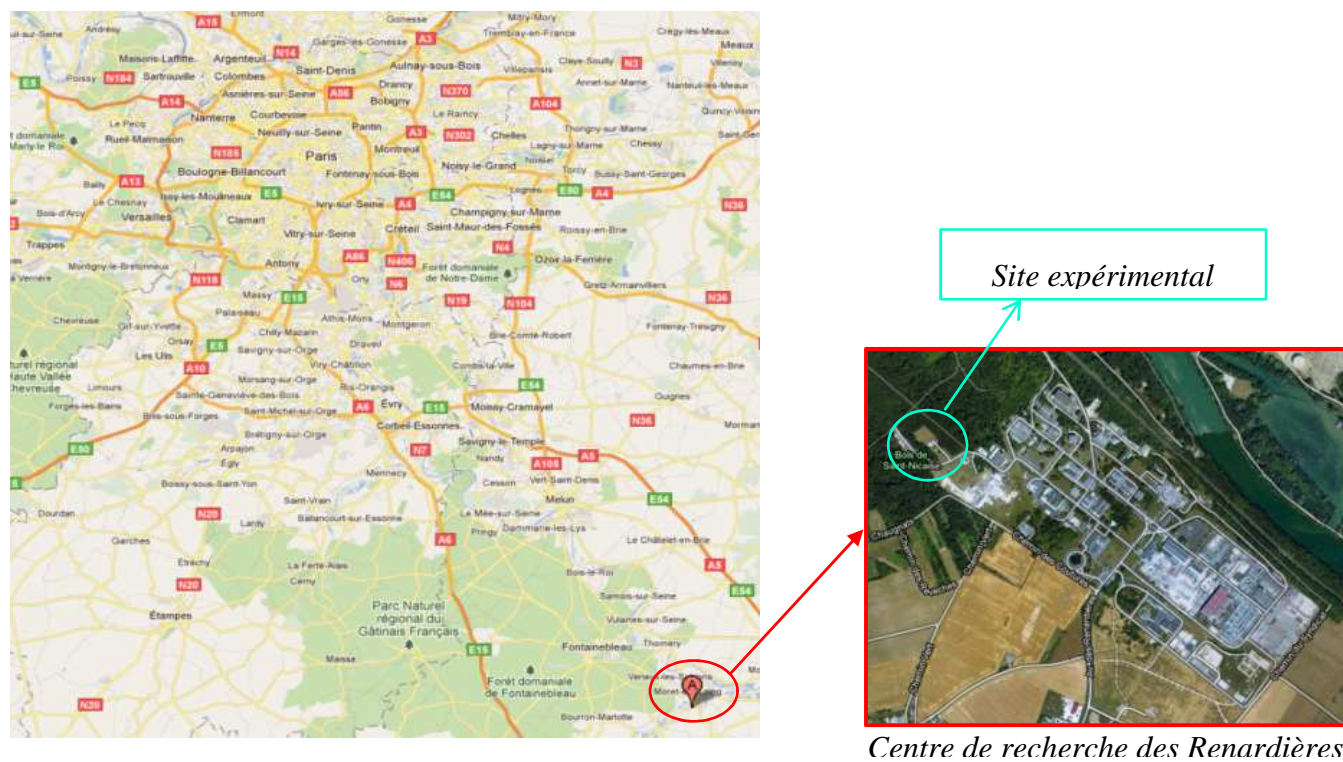


Figure 3.1 : Localisation du site expérimental

3.3 Technique de forage

La figure 3.3 présente une coupe géologique du site d'essai. Sur les dix premiers mètres de profondeur, le sol est essentiellement sablonneux (sablon de Fontainebleau) mais peut être traversé par des langues de calcaire. Ce sol peu cohérent, propice aux éboulements et aux petites failles, impose un forage au rotary à boue (*mud rotary*) avec un tubage provisoire, normalement inséré à l'avancement. L'emploi de la technique du rotary à boue (tête de forage classique en trépons à molettes visible sur la figure 3.2) nécessite l'injection permanente d'eau sous pression dans le puits, au cours du forage.

L'injection permanente d'eau doit permettre à la fois d'exercer une pression sur la tête de forage et permettre l'évacuation des débris jusqu'à la surface. Pour ce faire, un bac à boue est aménagé à proximité du site de forage. Une pompe puise l'eau du bac à boue et l'injecte dans le puits par la tige de forage. Les débris boueux remontent à la surface et sont évacués vers le bac à boue via une tuyauterie (en forme de « T », figure 3.4). Par décantation, les débris solides se retrouvent au fond du bac à boue et c'est l'eau de surface qui est puisée.

Comme précisé ci-dessus, un tubage provisoire des forages, destiné à maintenir les parois des puits le temps de l'introduction des sondes et du coulis de remplissage, est nécessaire. Dans le cadre de ce projet de très faible profondeur, un tubage à l'avancement, consistant à introduire le tubage au fur et à mesure du forage, a été jugé trop lent et fastidieux par les foreurs. Une autre procédure a donc été privilégiée, consistant à décomposer les opérations de forage et de tubage en plusieurs étapes.

Un premier forage « nu » est réalisé jusqu'à une profondeur de 10 mètres et à un diamètre relativement important de 140 mm. Après retrait de la tige de forage, la sonde, préalablement préparée, est introduite rapidement dans le puits. Si aucun éboulement n'a eu lieu et que la sonde est bien à 10 mètres de profondeur, le puits est alors rempli totalement avec un coulis de remplissage (cf. ci-dessous). Sur 17 puits, ce cas favorable ne s'est présenté que deux fois.

Dans le cas le plus courant, il y a éboulement d'une partie des parois et la sonde est retirée. Un tubage de diamètre 130 mm est introduit facilement jusqu'au point d'éboulement. Une tête de forage de 120 mm est introduite pour re-forer au niveau de l'éboulement, le tubage complémentaire étant alors introduit à l'avancement.

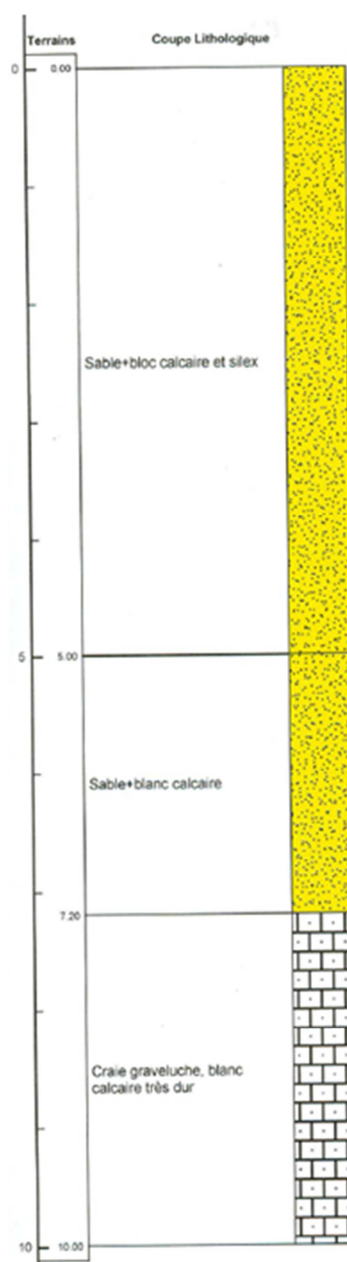


Figure 3.3 : Coupe géologique du sol



Figure 3.2 : Tête de forage en trépan à molette

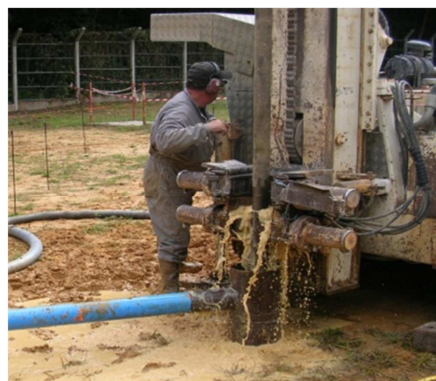


Figure 3.4 : Forage par rotary à boue (bac à boue illustré à droite)

La sonde en simple-U constituée de polyéthylène haute densité, PEHD, est alors introduite définitivement. Les foreurs ayant pris la décision, compte tenu de la très faible profondeur, d'effectuer un remplissage gravitaire du puits, aucun tube d'injection de coulis n'est positionné entre les tubes de la sonde. Or, ce tube d'injection sert classiquement d'écarteur entre les tubes de sonde pour limiter les interférences thermiques entre ceux-ci. Il a donc été nécessaire d'insérer des écarteurs régulièrement sur la longueur de la sonde pour maintenir un écartement de 5 cm centre-à-centre entre les tubes tel qu'illustré à la figure 3.5.



Figure 3.5 : Écarteurs entre les tubes

Comme précisé ci-dessus, le remplissage du puits par un coulis *ThermoCem Plus* est effectué de manière gravitaire (cf. figure 3.6), c'est-à-dire versé manuellement depuis la surface. Ce remplissage manuel impose de préparer le coulis au fur et à mesure, bidon par bidon. Cette méthode, quelque peu grossière, peut poser de sérieux problèmes d'homogénéité, à la fois du remplissage du puits et du coulis lui-même.



Figure 3.6 : Remplissage manuel d'un puits

3.4 Description du champ géothermique

3.4.1 Géométrie du champ et des puits

Le champ géothermique comporte 16 puits disposés en configuration carrée 4 x 4. Chaque puits est espacé de 3 m, centre à centre, avec le puits voisin. La longueur d'échange a une profondeur de 9 mètres et la tête du puits se trouve à 1 mètre sous la surface du sol. La figure 3.7 illustre la géométrie du champ et la figure 3.8 les dimensions d'un puits. Les écarteurs, au nombre de quatre par tube en «U», permettent de maintenir un espacement de 5 cm entre le centre du tube descendant et le centre du tube ascendant.

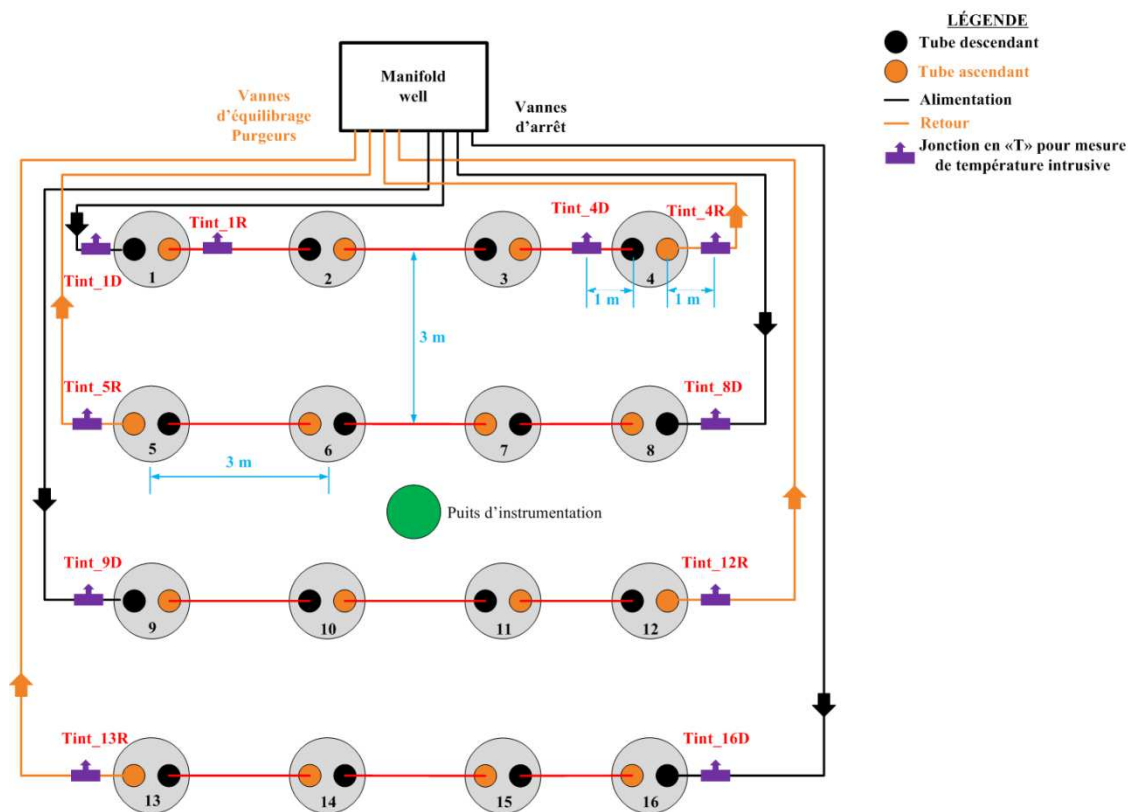


Figure 3.8 : Géométrie du champ géothermique

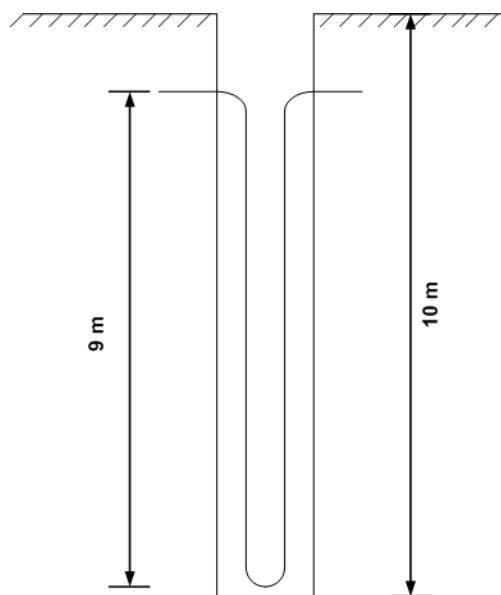


Figure 3.7 : Géométrie d'un puits géothermique

3.4.2 Raccordement entre les puits

Les quatre puits d'une même rangée sont raccordés en série puis les rangées 1 et 3 sont raccordées en parallèle, de même que les rangées 2 et 4. De plus, l'alimentation du fluide caloporteur est faite à contre sens. C'est-à-dire que la direction du fluide circulant dans le circuit en parallèle regroupant les rangées 1 et 3 est l'opposée de la direction du fluide circulant dans le circuit en parallèle regroupant les rangées 2 et 4. La figure 3.7 montre ces raccordements. Tel que montré à la figure 3.9, il y a donc 4 tuyaux d'alimentation et de retour qui sont raccordés à deux nourrices. Chaque circuit est muni d'un débitmètre ce qui permet de s'assurer que chaque circuit a un débit identique.



Figure 3.9 : Raccordement des tuyaux aux nourrices et débitmètre

3.4.3 Caractéristiques et propriétés des tubes, du coulis et du fluide caloporteur

Les tubes de PEHD ont un diamètre extérieur de 25 mm et une épaisseur de 2,3 mm. Le PEHD a une conductivité thermique de $0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Le manufacturier du coulis *ThermoCem PLUS* rapporte une conductivité thermique de $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Finalement, le fluide caloporteur circulant dans le système est un mélange d'eau et de mono propylène glycol à 30% dont le point de congélation est -13°C et le point d'ébullition est 139°C .

3.5 Instrumentation du site expérimental

Des sondes PT-100, illustrées à la figure 3.10, sont utilisées pour la mesure des températures. Il est à noter qu'en général une sonde PT-100 est constituée de quatre fils, mais dans le cas présent, les sondes PT-100 contiennent chacune huit fils ce qui permet de dupliquer le circuit de mesure. Si un circuit de quatre fils fait défaut, le circuit supplémentaire assure la transmission des données. Il est à noter qu'une longueur de filage suffisante a été planifiée afin d'éviter d'avoir recours à des joints souterrains. De plus, tout le filage des sondes PT-100 est placé dans des fourreaux (de couleur rouge sur la figure 3.11) qui sont eux-mêmes placés dans des tranchées reliant les puits au collecteur principal. Tel qu'illustré à la figure 3.11, les tubes d'alimentation et de retour sont également installés dans ces tranchées. Ces derniers sont espacés d'environ une vingtaine de centimètres de façon à limiter l'interférence thermique.

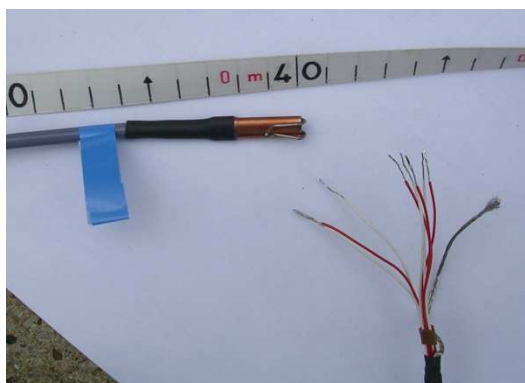


Figure 3.10 : Sonde PT-100



Figure 3.11 : Fourreaux (en rouge) et tubes d'alimentation et de retour (en noir)

Dix mesures de température du fluide caloporteur sont réalisées. Ces mesures intrusives sont réparties de la façon suivante : cinq à l'entrée d'un tube descendant (puits 1, 4, 8, 9 et 16) et cinq à la sortie d'un tube ascendant (puits 1, 4, 5, 12 et 13). La figure 3.7 présente ces points de mesure de température. Ces mesures permettent de connaître la température du fluide à l'entrée et à la sortie de chacune des quatre rangées. Les puits 1 et 4 sont également tous deux instrumentés pour la réalisation d'un essai de réponse thermique puisque la température à l'entrée et à la sortie du puits sont mesurées. Il est à noter que des jonctions en «T» thermofusionnées, présentées à la figure 3.12, ont été utilisées pour l'installation des sondes nécessaires à la prise de mesure de température intrusive au centre du tube. De plus, la longueur de 1 mètre entre la tête du puits et le joint thermofusionné, telle que présentée à la figure 3.13, est isolée avec un isolant de type Armaflex d'une épaisseur de 12 mm et ce pour chacune des dix positions de mesure de température intrusive.



Figure 3.12 : Jonctions en «T»

Les puits 1 et 4 sont instrumentés afin de mesurer six températures de paroi pour chacun de ces puits. Les mesures sont prises à 2, 5 et 9 mètres sous la surface du sol sur les tubes descendants et ascendants. La figure 3.14 montre la position des sondes dans le puits. Le mode de fixation des sondes est illustré à la figure 3.15. Il consiste à fixer la sonde sur le tube à l'aide d'un ruban adhésif.

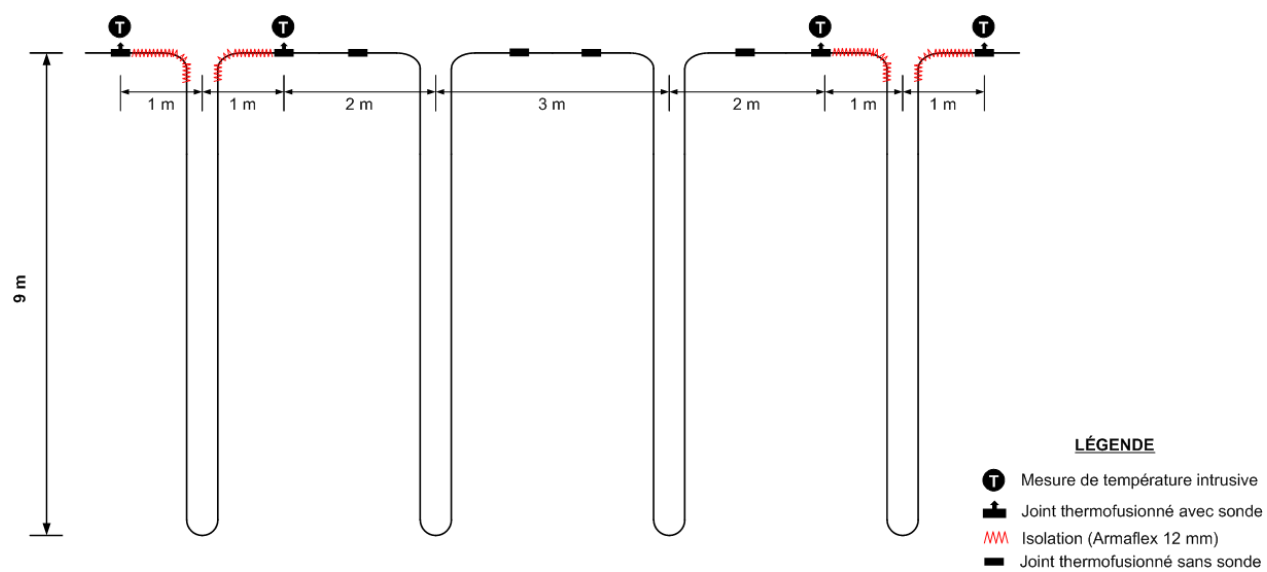


Figure 3.13 : Schéma de la branche 1

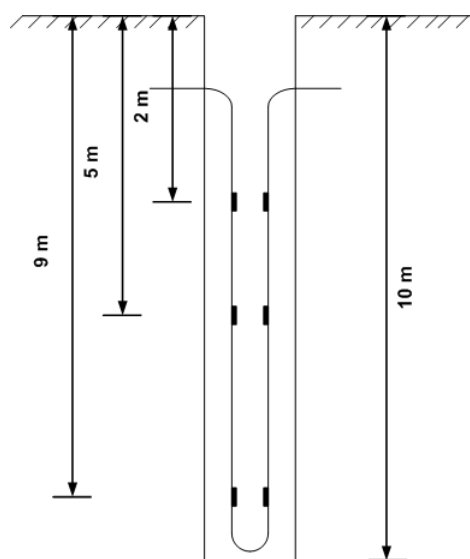


Figure 3.14 : Position des sondes de mesure de température de paroi dans les puits 1 et 4



Figure 3.15 : Fixation de la sonde sur le tube

Un puits d'instrumentation, qui n'est pas relié au fluide circulant dans les 16 autres puits, est installé au centre du champ géothermique, tel qu'illustré à la figure 3.7. Ce puits est constitué d'un tube dont le diamètre extérieur est 33,5 mm et l'épaisseur 3,5 mm. Il vise à mesurer la température du sol à 1, 2, 5 et 9 mètres sous la surface du sol, tel que montré à la figure 3.16. Pour ce faire, la sonde PT-100 est fixée au tube, à l'aide de ruban adhésif, mais de façon à ce qu'elle ne touche pas au tube, tel que montré à la figure 3.17. Ce faisant, l'impact de la conduction axiale du tube est réduit et la mesure de la sonde sera celle de la température du sol.

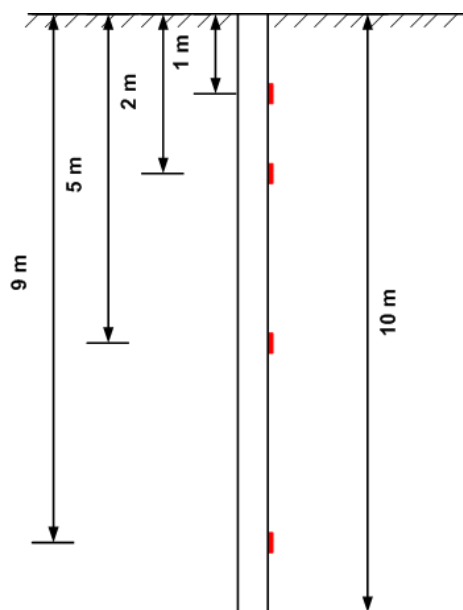


Figure 3.16 : Localisation des sondes de mesures de la température du sol dans le puits d'instrumentation



Figure 3.17 : Fixation typique d'une sonde PT-100 dans le puits d'instrumentation

Finalement, des mesures de la température du sol non perturbé sont effectuées à 5 et 20 mètres sous la surface du sol à un endroit suffisamment éloigné du champ géothermique de 16 puits pour ne pas être affecté par celui-ci. De plus, une mesure de la température du sol non perturbé à 1 mètre sous la surface du sol est effectuée à plus de quinze mètres du puits collecteur.

3.6 Problèmes rencontrés lors de la construction

Cette section présente les problèmes liés à la construction des puits et à l'instrumentation du site. Les puits 16 et 12 ont été forés les premiers et les écarteurs ont été oubliés alors que le puits 8, foré le troisième, possède des écarteurs improvisés tels qu'illustrés à la figure 3.18. Les treize autres puits possèdent chacun quatre écarteurs commerciaux tels qu'illustrés à la figure 3.5.



Figure 3.18 : Écarteur improvisé du puits 8

Un problème est survenu lors de la manipulation de la sonde PT-100 mesurant la température du fluide à la sortie du puits 8. En voulant mettre les câbles de la sonde dans les fourreaux, le câble contenant les 8 fils est sorti de la gaine en acier inoxydable et il a été impossible de les réinsérer. Pour solutionner ce problème, une sonde PT-100 récupérée sur le chantier a été entrée dans la gaine vide de la sonde déjà installée puis fixée avec du ruban adhésif. Une sonde avec une gaine de 4 mm, identifiable par le fil blanc sur la figure 3.19, est donc insérée dans la gaine de 6 mm. En analysant les premiers tests d'acquisition de données, il a été constaté que ladite sonde présente un écart d'environ 1°C inférieur par rapport aux autres sondes.

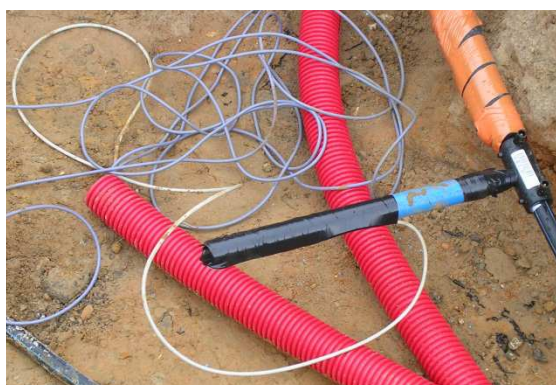


Figure 3.19 : Réparation de la sonde PT-100 brisée (puits 8)

L'entreprise responsable du forage des puits est généralement tenue de remettre des coupes géologiques de tous les forages. Toutefois, une seule coupe géologique a été remise pour l'ensemble des forages alors que, selon l'équipe d'EDF présente au moment des travaux, les différents forages présentaient des différences géologiques telles que des failles ou des langues de calcaires plus ou moins profondes selon les puits.

Le remplissage du coulis par méthode gravitaire limite l'homogénéité du coulis sur la profondeur du puits. De plus, le nombre de sacs de coulis utilisés varie selon les puits tel qu'illustré à la figure 3.20. Ainsi les puits 1, 4, et 10 ont nécessité l'emploi d'un nombre de sacs de coulis beaucoup plus important ce qui semble indiquer la présence de failles dans ces puits. Il est à noter que, sur cette figure, les numéros indiqués à l'intérieur des cercles rouges correspondent à l'ordre de forage des puits.

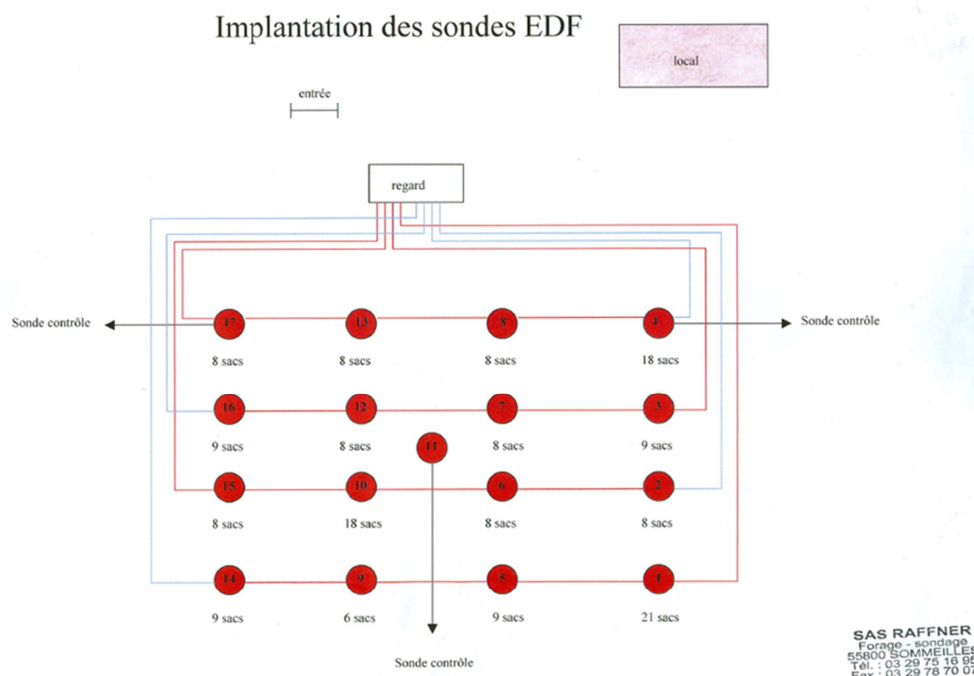


Figure 3.20 : Schéma d'implantation des sondes remis par le foreur

Lors du test de réponse thermique, il a été constaté que le puits 1 (17 sur la figure 3.20) ne présente presque pas d'échange thermique. En effet, une faible différence de quelques dixièmes de degrés Celsius est notée entre la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits 1 à ce moment. Ce puits est le dernier à avoir été foré et, selon l'équipe d'EDF présente au moment des travaux, des failles ont été repérées dans ce forage. Normalement, en présence de failles la quantité de coulis nécessaire au remplissage augmente. Cependant, seulement huit sacs ont été utilisés. Cela porte à croire qu'il y a eu colmatage dans les quelques mètres sous la surface du sol et que la majorité du puits se retrouve entouré d'air et donc thermiquement isolé du sol environnant. Cela pourrait justifier l'absence d'échange thermique dans ce puits.

3.7 Description de la plate-forme « Climat naturel »

La plate-forme Climat naturel est située à quelques mètres du champ de puits géothermiques de faible profondeur. Cette plate-forme permet d'analyser la performance des systèmes géothermiques dans des conditions quasi-réelles. Elle est utilisée afin de tester des systèmes géothermiques novateurs et est dotée d'un bâtiment abritant une salle des machines (où l'on

retrouve des pompes à chaleur, six ballons de 500 L d'eau et une centrale d'acquisition de données), d'aéroréfrigérants à l'extérieur ainsi que d'une station météo mesurant la pluviométrie, la température extérieure, l'humidité de l'air extérieur et l'ensoleillement.



Figure 3.21 : Salle des machines

Dans le cadre de cette étude, le champ de puits géothermiques de faible profondeur est relié à une pompe à chaleur eau-eau d'une puissance nominale de 4,1 kW présentant un COP de 3,7 lorsqu'elle opère à 0°C du côté évaporateur et 35°C du côté condenseur. Cette pompe à chaleur est elle-même liée à un ballon de 500 L d'eau qui simule la masse thermique d'un bâtiment à basse consommation énergétique (BBC). La boucle d'eau secondaire est liée, par un échangeur à plaques, à une boucle d'eau glycolée primaire circulant à travers un aéroréfrigérant. Ce dernier simule les déperditions thermiques du BBC. La figure 3.22 illustre les deux boucles présentées ci-dessous.

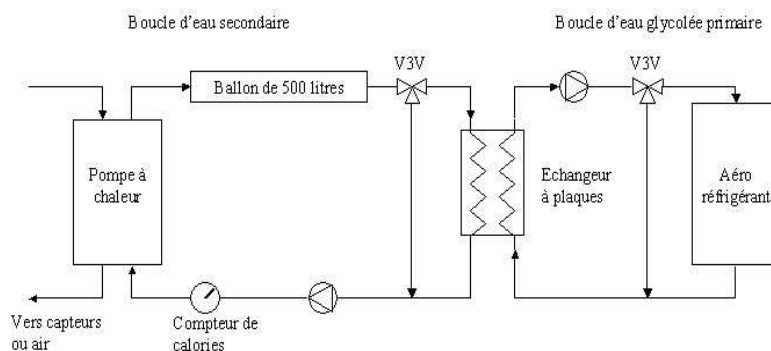


Figure 3.22 : Schéma de fonctionnement de l'installation

La régulation de ce système est réalisée sur une base horaire. Au début de l'heure, la température de consigne du ballon est calculée à partir de la température extérieure moyenne mesurée au cours de l'heure précédente et de la loi d'eau de la PAC. La figure 3.23 illustre la loi d'eau sur la température de retour d'eau du réseau de chauffage, i.e. la température de sortie du ballon de stockage dans ce cas-ci, en fonction de la température extérieure. Il est à noter qu'un différentiel de 2°C est appliqué, c'est-à-dire que, pour une température extérieure de 0°C, la pompe à chaleur est mise en marche à une température de retour d'eau de 33°C et sera arrêtée lorsque celle-ci atteindra 37°C.

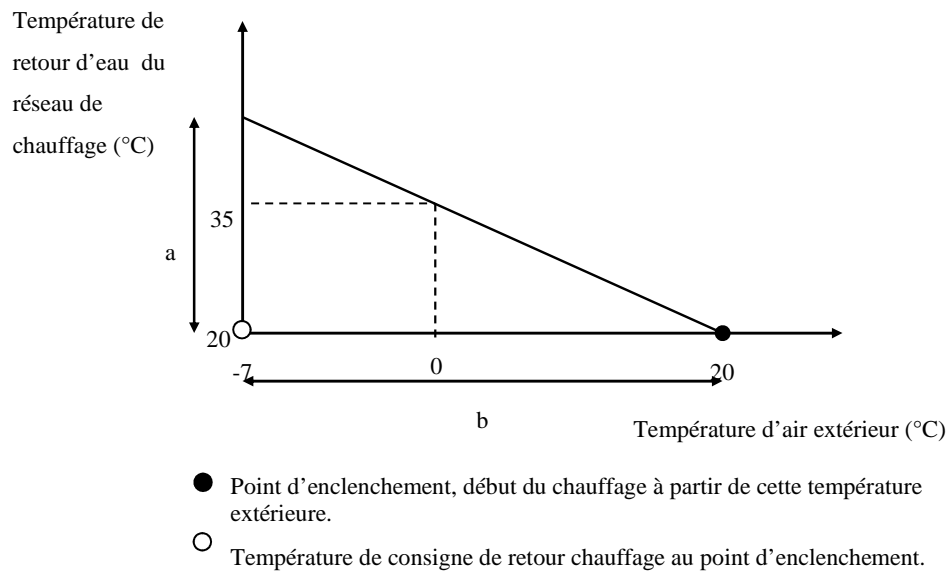


Figure 3.23 : Loi d'eau de la PAC

Le besoin de chauffage du BBC, dénoté par la lettre Q , est calculé comme suit:

$$Q = GV(T_{\text{non-chauffage}} - T_{\text{extérieure}}) \quad (3.1)$$

Où G est le coefficient de déperdition thermique volumique du BBC, soit 0,45 W/m³K, V est le volume chauffé, soit 300 m³ pour représenter une surface de 120 m² et $T_{\text{non-chauffage}}$ est la température de non-chauffage fixée à 12°C. Il est à noter que ces valeurs ont été fixées par EDF. De plus, afin d'observer de plus longues périodes de fonctionnement en continu, les besoins ont été augmentés à partir du 7 février 2012, vers 16h00. Pour ce faire, le volume chauffé a été augmenté de 300 à 400 m³.

Le cycle de fonctionnement est décrit ci-dessous. L'aéroréfrigérant est mis en marche afin de diminuer la température du ballon jusqu'à ce que la température de retour de l'eau à la PAC provoque le démarrage de celle-ci. Alors, le fluide caloporteur circule dans les puits géothermiques et absorbe de la chaleur du sol, puis revient à la PAC qui chauffe le ballon de 500 L. Un calorimètre mesure la quantité d'énergie accumulée dans le ballon et lorsque cette valeur atteint le besoin de chauffage pour l'heure considérée, la vanne trois voies de la boucle primaire est coupée. Cela permet d'arrêter de rejeter de la chaleur du ballon vers l'extérieur. De ce fait, la température de retour de l'eau à la PAC augmente et provoque l'arrêt de celle-ci. Il est important de noter que le fonctionnement de la PAC n'est pas cyclique. En effet, elle est mise en marche au début d'une heure, et ce, jusqu'à ce que le besoin de chauffage soit comblé. La PAC demeure arrêtée pour le temps restant de l'heure de calcul et le processus reprend à l'heure suivante.

3.8 Résumé du chapitre

Le site expérimental étudié dans le cadre de cette étude est donc bien instrumenté, mais présente certains problèmes de construction qui doivent être gardés en tête pour les étapes ultérieures étant donné leur impact sur le test de réponse thermique présenté au prochain chapitre et sur certains résultats expérimentaux présentés au chapitre 5. D'autre part, la plate-forme *Climat Naturel* permet de reproduire le comportement réel d'un bâtiment à basse consommation énergétique et permet donc d'analyser les performances énergétiques et le potentiel de la technologie que représentent les capteurs verticaux peu profonds.

CHAPITRE 4 TEST DE RÉPONSE THERMIQUE

4.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la description du test de réponse thermique réalisé du 10 au 17 octobre 2011 sur le site expérimental. Dans un premier temps, la description d'un test de réponse thermique (TRT) classique est abordée. Ensuite, la description du test de réponse thermique réalisé est présentée. Finalement, les résultats sont présentés et analysés.

4.2 Description d'un test de réponse thermique classique

Cette section présente la fonction et les étapes d'un TRT classique. Ce test vise à déterminer la conductivité thermique du sol (k) et la résistance thermique des puits installés (R_b). Trois étapes caractérisent un test de réponse thermique.

La première étape consiste à effectuer un essai de circulation de fluide caloporteur en continu. Cela consiste à faire circuler le fluide caloporteur dans un puits d'essai, pendant un minimum de 12 heures, afin de mesurer la température moyenne du milieu géologique non perturbé au moment de l'essai et d'identifier les sondes défectueuses. Pour ce faire, la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits d'essai est mesurée.

Le TRT proprement dit s'étend sur un minimum de 72 heures. Cette deuxième étape consiste à transférer de la chaleur à un puits d'essai géothermique, généralement à l'aide d'une unité mobile comportant un élément chauffant et une pompe de circulation du fluide, et à mesurer la variation de température de fluide entre l'entrée et la sortie du puits d'essai.

La troisième étape en est une de restitution thermique et elle consiste à faire circuler le fluide caloporteur dans le puits d'essai mais sans apport de chaleur. Il est possible d'utiliser la température du fluide lors de cette période de restitution dans l'évaluation de la conductivité thermique du sol.

4.3 Description du test de réponse thermique réalisé

Cette section aborde d'abord les deux aspects du TRT réalisé qui diffèrent d'un test classique, soit la réalisation du TRT en faisant circuler le fluide dans quatre puits connectés en série plutôt que dans un seul puits et la réalisation du TRT en utilisant la pompe à chaleur (PAC) intégrée au

site expérimental pour la «phase de chauffage» plutôt qu'une unité mobile de chauffage. Ces deux variations sont documentées ci-dessous. Pour terminer cette section, les trois étapes du TRT réalisé sont présentées.

4.3.1 Variation 1 - Circulation du fluide dans la première branche

Lors d'un TRT classique, un seul puits est généralement utilisé. Or, étant donné la configuration particulière du champ géothermique étudié, soit 16 puits de faible profondeur connectés à contre-courant, la première branche de quatre puits (puits 1 à 4 illustrés à la figure 4.1) est utilisée afin d'observer un écart de température significatif pour l'analyse.

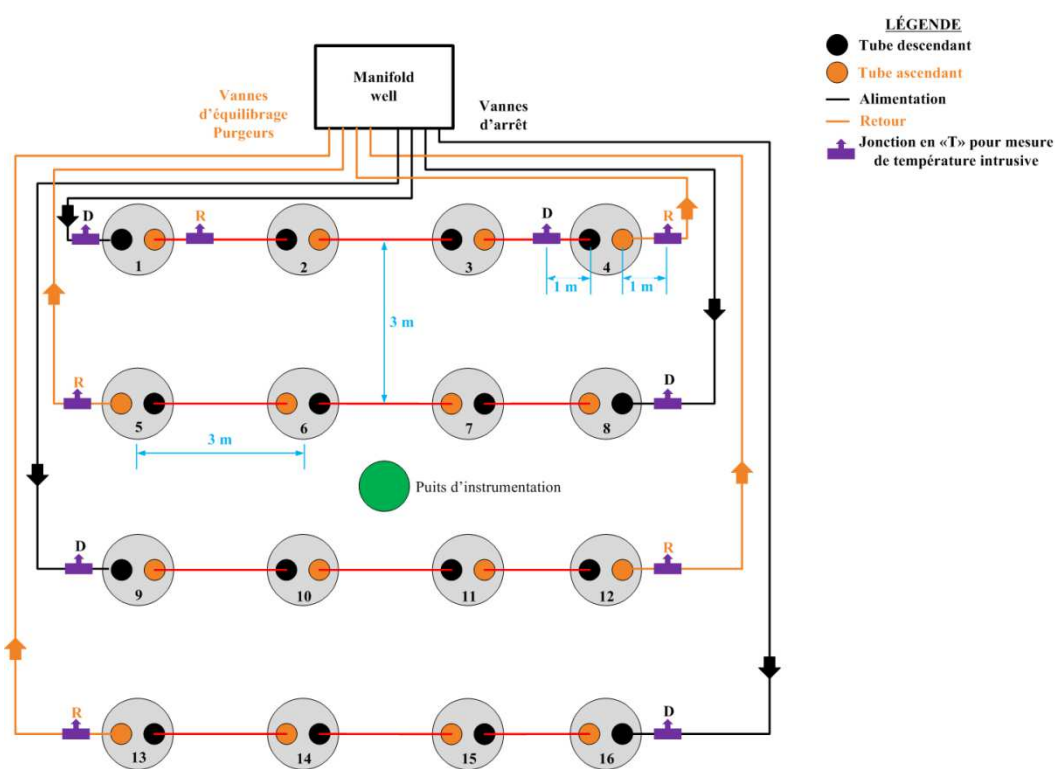


Figure 4.1 : Configuration du champ géothermique étudié

Tel qu'illustré à la figure 4.2, les puits 1 et 4 sont instrumentés comme suit :

1. Une sonde de mesure de température intrusive du fluide aux entrées des puits 1 et 4 (Tint_1D et Tint_4D)
2. Une sonde de mesure de température intrusive du fluide aux sorties des puits 1 et 4 (Tint_1R et Tint_4R)

3. Six sondes mesurant la température à la paroi du puits à 2, 5 et 9 m de profondeur sur les tubes descendants et ascendants des puits 1 et 4.

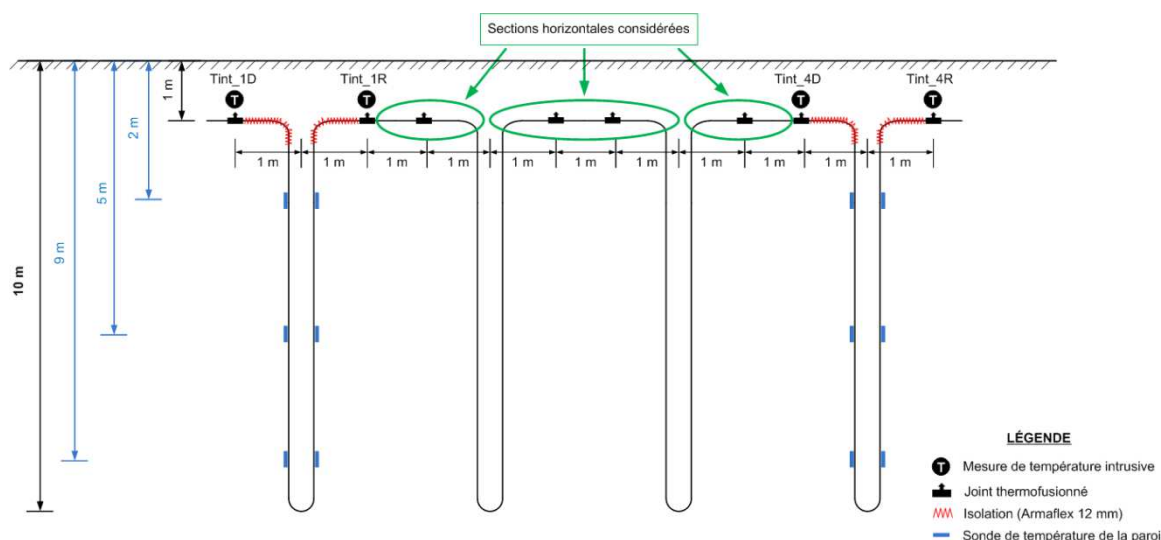


Figure 4.2 : Instrumentation de la branche 1 du champ de puits géothermiques étudié

Des calculs préliminaires ont permis de détecter que le puits 1 est défectueux. En effet, la différence de température entre la température du fluide à l'entrée (T_{int_1D}) et la sortie du puits 1 (T_{int_1R}) est très faible. Il semble donc qu'un mauvais remplissage du coulis ait été réalisé et que ce puits se retrouve entouré majoritairement d'air et donc thermiquement isolé du sol. Ce problème est détaillé dans la section 3.6. Ainsi, le TRT est réalisé en faisant circuler le fluide à travers les puits 1 à 4, mais en analysant la variation de température seulement entre les puits 2 et 4, soit entre la sortie des puits 1 (T_{int_1R}) et 4 (T_{int_4R}).

Comme les puits sont de faible profondeur, les trois sections horizontales identifiées à la figure 4.2 constituent une portion non-négligeable du circuit étudié. En effet, les 7 m de sections horizontales sur les 61 m de tuyau considérés dans ce TRT, soit entre la sonde T_{int_1R} et T_{int_4R} , représentent près de 11% de la longueur totale étudiée pour ce test. Il est donc important d'estimer les pertes/gains thermiques associés aux trois sections horizontales afin d'en tenir compte lors de l'analyse des données. Ces pertes/gains thermiques sont estimés à l'aide du TYPE952 exploité par le logiciel de simulation TRNSYS. Ce type modélise le transfert de chaleur dans une conduite horizontale enterrée. La section 4.4 présente en détail l'utilisation du TYPE952 dans le cadre de l'analyse de ce TRT.

4.3.2 Variation 2 – Utilisation de la PAC intégrée au site expérimental

Lors d'un TRT classique, une unité mobile comportant un élément chauffant et une pompe de circulation du fluide est utilisée pour la deuxième phase du TRT, soit la «phase de chauffage». Au cours de cette phase, le fluide caloporteur est chauffé par l'élément chauffant contenu dans l'unité mobile de chauffage et, lors de son passage dans le puits d'essai, la chaleur est transférée du fluide vers le sol. On note donc une diminution de la température du fluide au cours de son passage dans le puits d'essai. Ainsi, dans le cadre d'un TRT classique, le terme «phase de chauffage» signifie chauffage du sol par transfert de chaleur du fluide caloporteur vers le sol.

Au contraire, dans le cadre du TRT réalisé ici, le terme «phase de chauffage» signifie chauffage du fluide caloporteur par extraction de chaleur du sol. En effet, l'utilisation de la PAC intégrée au site expérimental permet d'extraire la chaleur du sol pour la transmettre au fluide caloporteur. Ainsi, la température du fluide augmente au cours de son passage dans la branche 1. Il est à noter que l'utilisation de la PAC installée sur le site de test permet d'éviter les frais associés à la location d'une unité mobile.

La figure 4.3 présente un rappel du système installé dans la plate-forme expérimentale Climat-naturel. Le champ de seize puits géothermiques de faible profondeur est lié à une pompe à chaleur eau-eau de 4,1 kW présentant un COP de 3,7 lorsqu'elle opère à 0°C du côté évaporateur et 35°C du côté condenseur. Cette pompe à chaleur est elle-même liée à un ballon tampon de 500 L d'eau qui agit comme bâtiment virtuel. La boucle d'eau secondaire est liée, par un échangeur à plaques, à une boucle d'eau glycolée primaire circulant à travers un aéroréfrigérant. Ce dernier simule les déperditions thermiques du bâtiment virtuel.

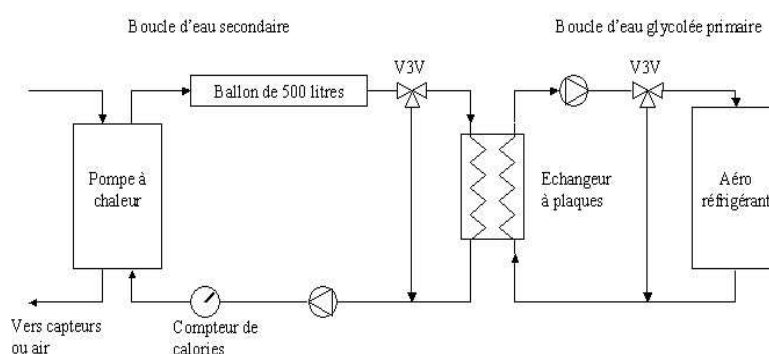


Figure 4.3 : Schéma de fonctionnement de l'installation

Pour la durée du TRT, le système de contrôle de la PAC a été modifié de façon à ce que la température extérieure vue par la PAC soit maintenue à environ -30°C afin qu'elle fonctionne sans arrêt tout au long du test. Avant de procéder à la réalisation du TRT, ce dernier est simulé à l'aide du TYPE272, un modèle de puits géothermique exploité dans l'environnement de simulation TRNSYS. Le tableau 4.1 présente les paramètres utilisés pour la simulation du TRT.

Tableau 4.1 : Paramètres imposés pour la simulation du TRT

Paramètre	Valeur	Unité
Température du sol non perturbé	15	C
Conductivité thermique du sol	2	Wm ⁻¹ K ⁻¹
Hauteur du puits (sous la tête du puits)	9	m
Profondeur de la tête du puits	1	m
Rayon d'un puits	0,07	m
Résistance thermique d'un puits	0,1	mKW ⁻¹
Chaleur spécifique du fluide caloporteur	3900	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Espacement centre-à-centre entre les puits	3	m
Débit de circulation	0,6	m ³ h ⁻¹
Circuit charge - Nombre de puits	4	-
Circuit charge - Nombre de branches	1	-
Circuit charge - Nombre de puits dans la branche no.1	4	-
Circuit charge - Fraction du débit dans la branche no.1	1	-

La simulation réalisée permet de remarquer qu'en opération continue le point de congélation du fluide circulant dans les puits, soit -13°C, serait atteint avant la fin du TRT. Il semble donc que la puissance d'extraction est trop importante pour ces puits de faible profondeur lorsque la PAC fonctionne sans arrêt. Comme le gel du fluide caloporteur entraînerait un bris de matériel, il est nécessaire de réduire la puissance d'extraction de chaleur de la PAC pour la réalisation du TRT. Pour ce faire, la plage de température à laquelle la PAC opère est étudiée.

En général, le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur opérant en mode chauffage diminue lorsque la différence entre la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur et à la sortie du condenseur augmente. Tel que montré à l'équation 4.1, une diminution du COP peut se traduire par une diminution de la puissance utile et donc de la puissance d'extraction de chaleur du sol dans le cas présent ($P_{\text{évaporateur}}$).

$$COP_{\text{chauffage}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{consommée}}} = \frac{P_{\text{évaporateur}} + \dot{W}_{\text{compresseur}}}{\dot{W}_{\text{compresseur}}} \quad (4.1)$$

où

P_{utile} est la puissance utile (kW)

$P_{consommée}$ est la puissance consommée (kW)

$P_{évaporateur}$ est la puissance à l'évaporateur (kW)

$\dot{W}_{compresseur}$ est le travail du compresseur (kW)

Afin de réduire la puissance d'extraction de chaleur du sol ($P_{évaporateur}$), l'eau contenue dans le ballon tampon de 500 L relié à la PAC est donc préchauffée à environ 60°C avant le début du TRT à l'aide d'un chauffe-eau d'appoint de 6 kW. Ainsi, au démarrage du TRT, la température de l'eau à la sortie du condenseur (entrée du ballon) est d'environ 60°C. Dans cette plage de température, la PAC opère à un COP plus faible que dans les conditions standards d'opération, soit un COP de 1,9 plutôt que 3,7. De ce fait, la puissance au condenseur passe de 4,1 kW à environ 3,7 kW et la puissance à l'évaporateur de 3,0 kW à environ 1,7 kW. À cette puissance d'opération, le risque de gel est évité. Le tableau 4.2 montre les puissances au compresseur, condenseur, à l'évaporateur et le coefficient de performance pour deux plages de température d'opération de la PAC.

Tableau 4.2 : Performance de la PAC selon la plage de température d'opération

Température d'opération		$P_{compresseur}$ (kW)	$P_{condenseur}$ (kW)	$P_{évaporateur}$ (kW)	COP
$T_{entrée à}$ l'évaporateur (°C)	$T_{sortie au}$ condenseur (°C)				
0	35	1,1	4,1	3,0	3,7
0	60	2,0	3,7	1,7	1,9

L'inconvénient lié à l'utilisation de la PAC installée plutôt qu'une unité mobile comportant un élément chauffant et une pompe de circulation est qu'il est plus difficile de maintenir constante la puissance de chaleur transmise au fluide circulant dans le circuit géothermique. La figure 4.4 montre l'évolution de la puissance à l'évaporateur au cours du TRT réalisé.

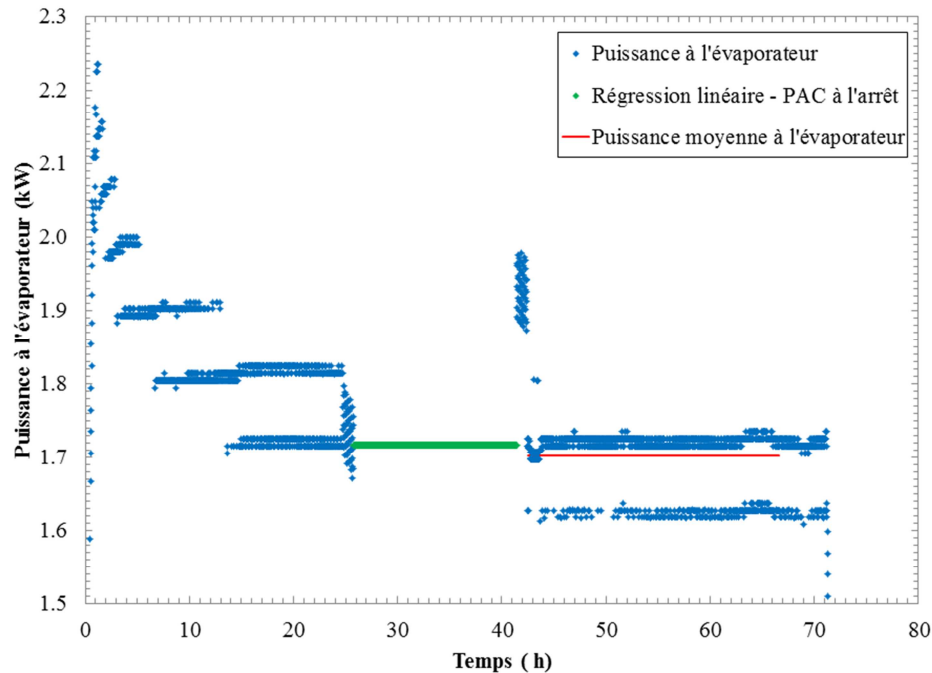


Figure 4.4 : Évolution de la puissance à l'évaporateur au cours de la phase de chauffage du fluide par extraction de chaleur du sol

La puissance à l'évaporateur tracée sur la figure 4.4 est calculée par une moyenne glissante sur une heure, telle que présentée à l'équation 4.2.

$$P_{\text{évaporateur}} = \left[\frac{E_{\text{thermique}}(i + 60\text{min}) - E_{\text{thermique}}(i)}{60 \text{ min}} \right] - \left[\frac{E_{\text{électrique}}(i + 60\text{min}) - E_{\text{électrique}}(i)}{60 \text{ min}} \right] \quad (4.2)$$

Où

$E_{\text{thermique}}$ est l'énergie thermique mesurée au ballon de 500 L (kWh)

$E_{\text{électrique}}$ est l'énergie électrique consommée par le compresseur (kWh)

En observant la figure 4.4, il est possible de remarquer qu'au début de la phase de chauffage du fluide (donc refroidissement du sol), la puissance à l'évaporateur est élevée puis diminue après quelques heures. Ces puissances relativement élevées s'expliquent par le fait qu'au début de la phase de chauffage du fluide (démarrage de la PAC), aucune chaleur n'a encore été extraite du sol. Ainsi, la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur (également la sortie de la branche 1) correspond à la température du sol à ce moment, soit environ 16°C. En mode chauffage, plus la température à l'entrée de l'évaporateur est élevée, plus le COP est élevé et donc plus la puissance

à l'évaporateur est grande. Une fois la PAC démarrée, la chaleur est extraite et transmise au fluide, mais rapidement la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur diminue, car le sol devient de plus en plus froid et donc le fluide y circulant aussi.

Il est possible de remarquer que la puissance à l'évaporateur fluctue entre différents plateaux. Ces sauts sont attribuables à la résolution de la prise de données (pas de temps d'une minute) mais ne représente pas des sauts de puissance réels. La moyenne glissante sur 60 minutes présentée à l'équation 4.2 vise à réduire ce phénomène.

Il est également important de souligner que l'acquisition de données s'est accidentellement arrêtée (sans arrêt de la PAC) pendant une période de 15h et 42 minutes. Une courbe a été tracée afin d'estimer le comportement de la PAC au cours de cette période. Pour ce faire, une droite reliant le dernier point avant l'arrêt et le premier point après la remise en marche de l'acquisition de données a été tracée et est représentée en vert sur la figure 4.4.

Finalement, le trait rouge représente la puissance moyenne à l'évaporateur, soit 1,7 kW, au cours de la période étudiée. Cette valeur est utilisée dans la méthode graphique présentée à la section 4.4.

4.3.3 Présentation des trois étapes du TRT réalisé

Lors de la première étape, un essai de circulation continue a été réalisé sur une période de 20 heures et 25 minutes, soit du 6 octobre 2011 à 13h00 au 7 octobre 2011 à 9h25. La figure 4.5 présente l'évolution de la température moyenne du fluide dans la première branche du champ géothermique pendant cette période. Cette température est obtenue en calculant la moyenne des températures du fluide à la sortie du puits 1 et à l'entrée et sortie du puits 4. La température moyenne varie entre 15,83°C et 15,93°C et la température moyenne sur la durée de l'essai est de 15,91°C. Comme la dispersion des données est faible, une température de 15,91°C est représentative de l'état du sol au moment du TRT et a été utilisée comme température moyenne du sol non perturbé dans les calculs subséquents.

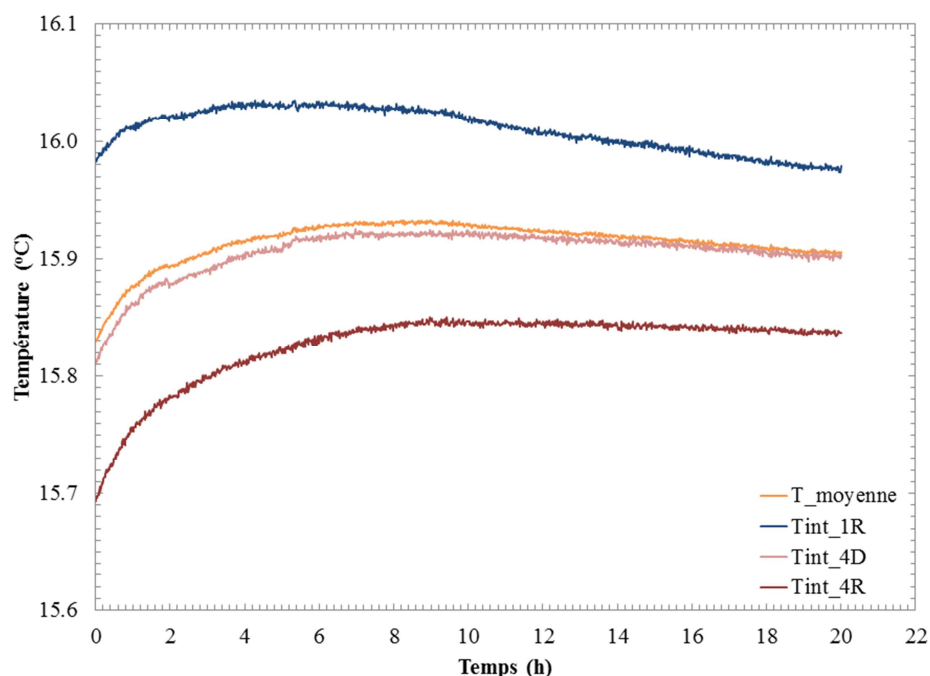


Figure 4.5 : Évolution des 3 températures intrusives des branches 1 et 4 ainsi que la température moyenne du fluide lors de l'essai de circulation continue

La phase de chauffage (extraction de chaleur du sol) s'est tenue du 10 octobre 2011 à 14h50 au 13 octobre 2011 à 15h05 pour une durée de 71 heures et 45 minutes et la phase de restitution du 13 octobre 2011 à 15h10 au 17 octobre à 16h00 pour une durée de 95 heures et 50 minutes. Le tableau 4.3 présente un journal temporel des phases d'extraction de chaleur et de restitution. On note deux arrêts de la PAC pendant de courtes périodes et un arrêt de l'acquisition de données pendant une longue période, sans toutefois que la PAC arrête. L'arrêt d'acquisition de données, survenu entre 16h36 le 11 octobre 2011 et 8h18 le 12 octobre 2011, a été approximé en traçant une droite entre les valeurs précédant et suivant l'arrêt d'acquisition de données.

Tableau 4.3 : Journal des événements survenus lors des phases de chauffage et de restitution

Date	Heure	Événement
2011-10-10	14h50	Démarrage de la PaC
2011-10-10	15h30	Arrêt de la PaC - Problème de régulation
2011-10-10	15h36	Redémarrage de la PaC
2011-10-10	15h47	Arrêt de la PaC - Problème de régulation
2011-10-10	15h55	Redémarrage de la PaC
2011-10-11	16h36	Arrêt de l'acquisition de données - Problème technique
2011-10-12	8h18	Reprise de l'acquisition de données
2011-10-13	15h05	Arrêt de la PaC (circulation arrêtée pendant 4-5 minutes)
2011-10-13	15h10	Phase de restitution
2011-10-17	16h00	Fin du TRT

4.4 Présentation et analyse des résultats du TRT

Cette section présente les résultats du TRT ainsi que l'analyse de ces derniers par la méthode graphique afin de déterminer la conductivité thermique du sol (k) et la résistance thermique des puits installés (R_b). Pour un cas classique, la méthode graphique consiste à tracer un graphique de la température moyenne du fluide entre l'entrée et la sortie du puits étudié en fonction du logarithme naturel du temps de l'essai. L'analyse de cette courbe mène ensuite à la détermination des propriétés du sol recherchées. Or, tel que mentionné plus haut, comme la variation de température est ici analysée entre les sorties du puits 1 et 4, il est nécessaire d'apporter quelques modifications à cette méthode pour tenir compte des sections horizontales.

4.4.1 Modélisation des sections horizontales

Premièrement, la portion étudiée de la branche 1 comporte trois sections horizontales de 2, 3 et 2 mètres non-isolées et enterrées à 1 mètre de profondeur entre la sortie du puits 1 et celle du puits 4 telles qu'illustrées à la figure 4.6. Un modèle de conduite enterrée (TYPE952 exploité par TRNSYS) d'une longueur de 7 m est donc utilisé afin d'estimer les pertes/gains thermiques dans ces trois sections horizontales à chaque pas de temps sur la durée de l'essai. Ceux-ci sont comptabilisés sous forme d'un écart de température nommé $\Delta T_{Horizontal}$ et donné par l'équation 4.3 :

$$\Delta T_{Horizontal} = T_{out_952} - T_{in_952} \quad (4.3)$$

Où

$\Delta T_{Horizontal}$ est l'écart de température dans les sections horizontales de 7 m de la branche 1 estimé par le TYPE952 (°C)

T_{in_952} est la température imposée à l'entrée de la conduite enterrée simulée par le modèle TYPE952 (°C)

T_{out_952} est la température à la sortie de la conduite enterrée calculée par le modèle TYPE952 (°C)

Le TYPE952 requiert une température du fluide à l'entrée, quelques propriétés et la température du sol dans lequel la conduite est enterrée afin de calculer la température à la sortie de la conduite.

D'abord, la température fournie en entrée au TYPE952 correspond à une température moyenne entre les sorties du puits 1 et 4. Cette température est évaluée au moyen de l'équation suivante:

$$T_{in_952} = T_{int-1R} + \frac{T_{int-4R} - T_{int-1R}}{2} \quad (4.4)$$

Où

T_{in_952} est la température imposée à l'entrée de la conduite enterrée simulée par le modèle TYPE952 (°C)

T_{int-1R} est la température intrusive du fluide mesurée à la sortie du puits 1 (°C)

T_{int-4R} est la température intrusive du fluide mesurée à la sortie du puits 4 (°C)

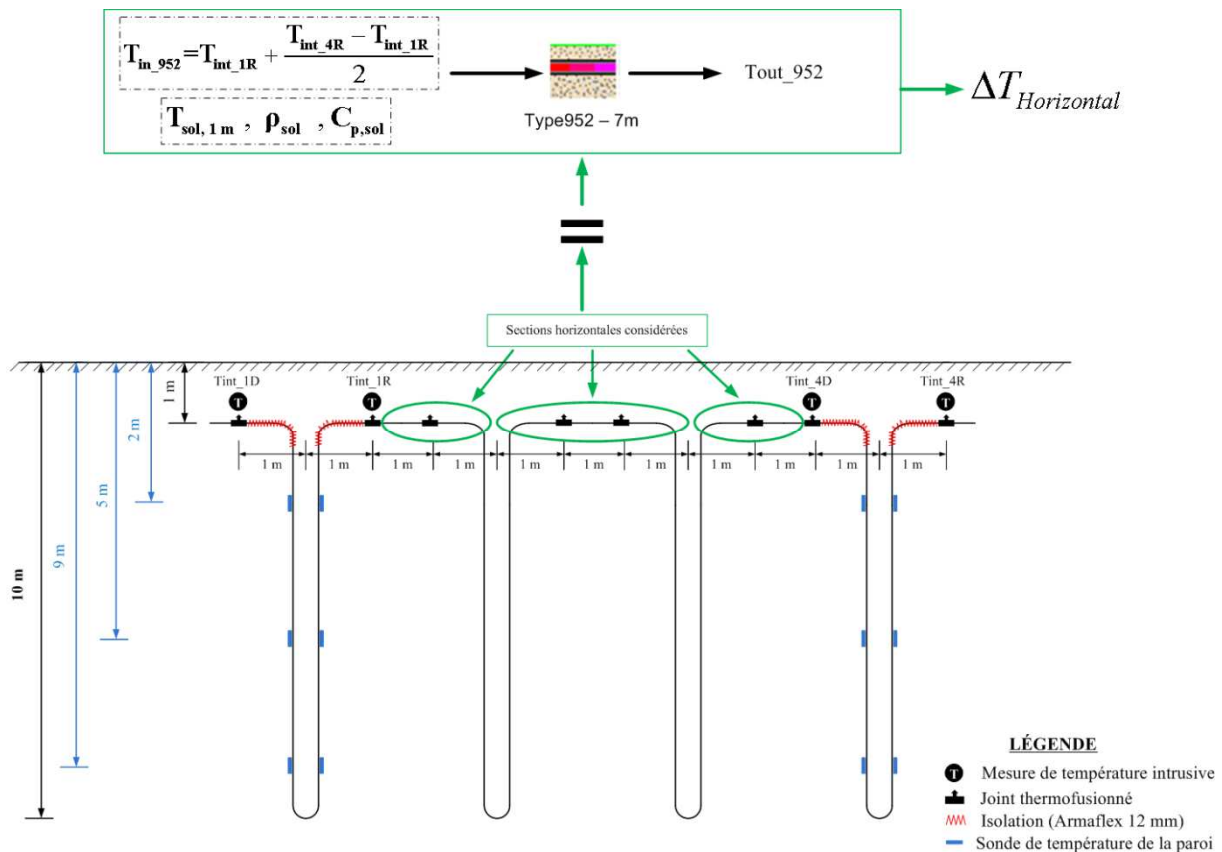


Figure 4.6 : Schématisation des sections horizontales de la branche 1 modélisées par le TYPE952

Les propriétés du sol sont inconnues *a priori* et doivent être imposées au TYPE952. Ainsi, la masse volumique et la chaleur spécifique du sol ont été fixées aux valeurs utilisées dans la thèse

de Kim (2011), soit 2300 kg/m^3 et $1135 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectivement. En effet, l'expérience de Kim s'est tenue sur un site expérimental localisé à quelques mètres du site testé dans la présente étude. La valeur de la conductivité thermique imposée au modèle du TYPE952 a été obtenue après trois itérations, en utilisant une valeur de départ tirée de la thèse de Kim (2011), soit $2,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Le tableau 4.4 présente les résultats issus des trois itérations. Finalement, la température du sol à la profondeur d'enfouissement de la conduite horizontale imposée au TYPE952 est fixée à la moyenne de la température à 1 m de profondeur telle que mesurée dans le puits d'instrumentation sur la durée du TRT.

Tableau 4.4 : Détermination de la valeur de k imposée dans le TYPE952

Itération	k imposée dans le Type952 (W/mK)	k calculée par la méthode graphique (W/mK)	% écart
Valeur initiale	2,30	2,55	9,80
1	2,55	2,52	1,19
2	2,52	2,52	0,00

Propriétés imposées au Type952		
$\rho_{\text{sol}} (\text{kg/m}^3)$	2300	Tirée de la thèse de Kim
$C_{p\text{sol}} (\text{J/kgK})$	1135	Tirée de la thèse de Kim

La figure 4.7 présente l'évolution de la température moyenne du sol sur la hauteur du puits d'instrumentation ainsi que de $\Delta T_{\text{Horizontal}}$ et de ΔT_{Total} . Cette dernière valeur représente la somme entre le gain de chaleur obtenu dans la portion verticale de l'échangeur (puits 2, 3 et 4) et le gain de chaleur dans la portion horizontale de l'échangeur considérée (7 m). En observant la figure 4.7, il est possible de remarquer que le $\Delta T_{\text{Horizontal}}$ moyen est de $0,68^\circ\text{C}$ sur la période étudiée, soit environ 18,2% du ΔT_{Total} de $3,7^\circ\text{C}$ sur la période étudiée. Il est donc important de corriger le ΔT_{Total} pour tenir compte de $\Delta T_{\text{Horizontal}}$ dans l'analyse du TRT.

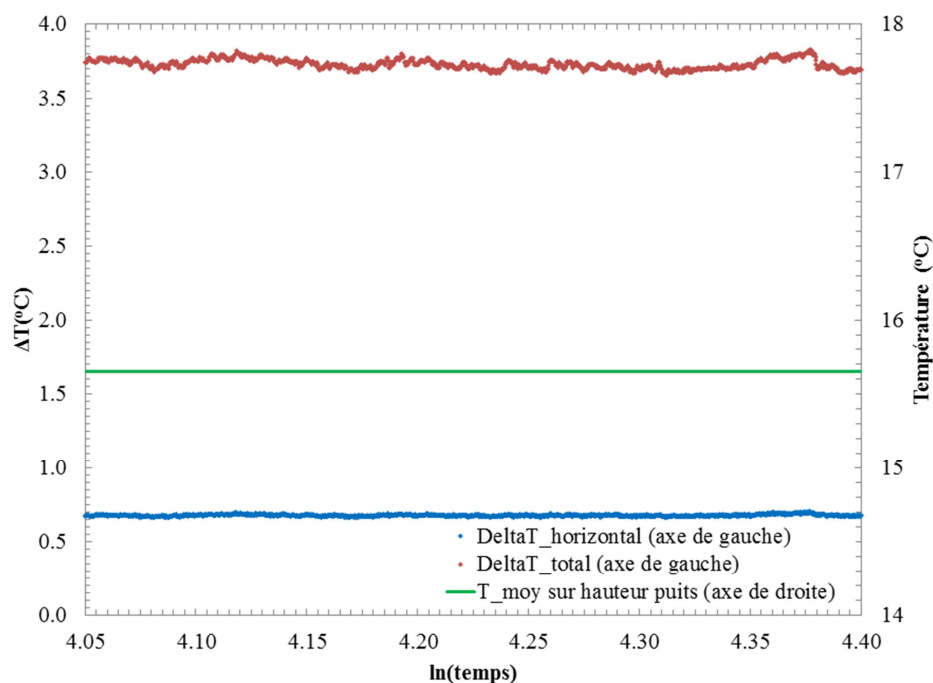


Figure 4.7 : Évolution de $\Delta T_{\text{Horizontal}}$, ΔT_{Total} et de la température à 1 m de profondeur dans le puits d'instrumentation sur la période étudiée dans la méthode graphique

4.4.2 Analyse des résultats par la méthode graphique

Cette section présente l'analyse des résultats du test de réponse thermique selon la méthode graphique présentée dans les travaux de Gehlin (1998). La figure 4.8 présente l'évolution de la moyenne des températures expérimentales du fluide aux sorties des puits 1 et 4 au cours de la phase d'extraction de chaleur du sol et de restitution. Il est à noter que le temps $t = 0$ h correspond au début de l'extraction de chaleur. En observant cette figure, il est possible de remarquer que la courbe obtenue est lisse et que peu de fluctuations sont notables.

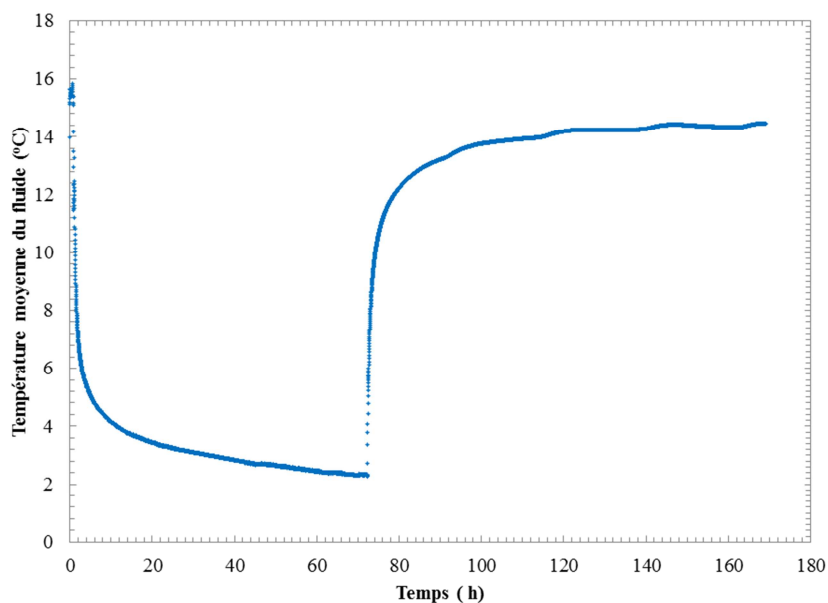


Figure 4.8 : Évolution de la température moyenne du fluide aux sorties des puits 1 et 4 au cours de la phase d'extraction de chaleur du sol et de restitution

Ensuite, un graphique de la température moyenne du fluide (T_m) aux sorties des puits 1 et 4 en fonction du logarithme naturel du temps est tracé. La portion linéaire sélectionnée s'étend entre 58,2 heures ($\ln(58,2) = 4,05$) et 82,7 heures ($\ln(82,7) = 4,40$) après le début du TRT. La figure 4.9 présente le graphique analysé.

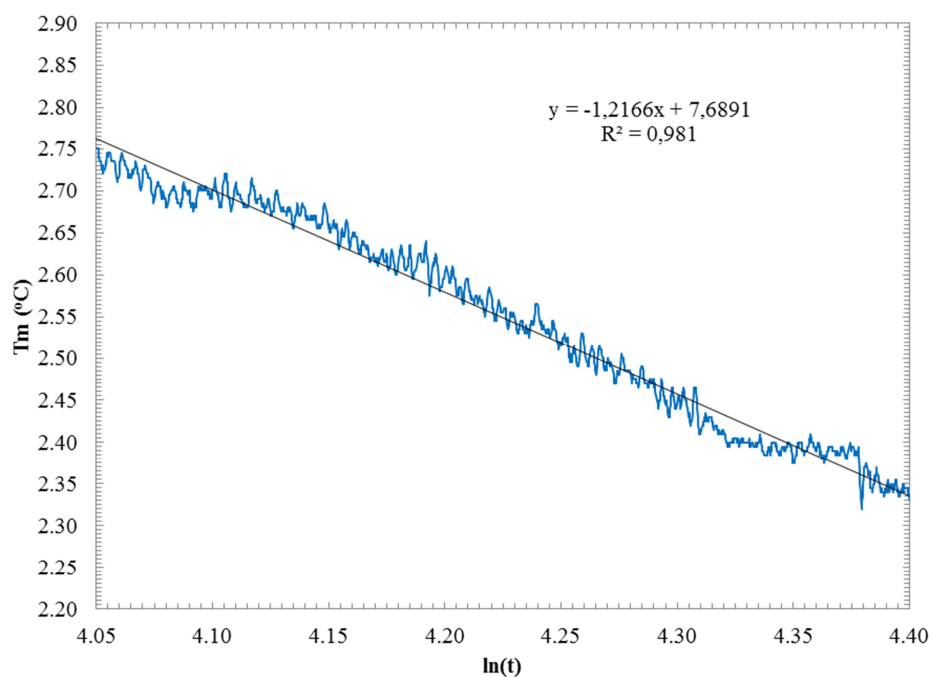


Figure 4.9 : Régression linéaire utilisée pour la méthode graphique

Une fois ce graphique tracé, il s'agit ensuite de calculer la puissance d'extraction de chaleur pour chaque pas de temps compris dans la période étudiée. L'équation 4.5 présente ce calcul.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\Delta T_{Vertical}) = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\Delta T_{Total} - \Delta T_{Horizontal}) = \dot{m} \cdot C_p \cdot ([T_{int-4R} - T_{int-1R}] - \Delta T_{Horizontal}) \quad (4.5)$$

où

Q est la puissance d'extraction de la chaleur du sol (W)

\dot{m} est le débit circulant dans la branche 1 (en moyenne 0,09 kg/s sur cette période)

C_p est la chaleur spécifique du fluide, soit $3900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$\Delta T_{Vertical}$ est la différence de température dans la portion verticale des puits utilisés pour le TRT, soit 2, 3 et 4 (°C)

ΔT_{Total} est la différence de température entre la sortie du puits 4 et la sortie du puits 1 (°C)

$\Delta T_{Horizontal}$ est la différence de température dans les sections horizontales de la branche 1 estimé par le TYPE952 (°C)

T_{int-4R} est la température du fluide à la sortie du puits 4 (°C)

T_{int-1R} est la température du fluide à la sortie du puits 1 (°C)

La valeur moyenne de la puissance d'extraction de chaleur par unité de longueur (\bar{q}) sur la portion étudiée est ensuite obtenue en effectuant la moyenne des puissances calculées à chaque pas de temps et en divisant celle-ci par la longueur verticale d'échange, soit 27 m (3 puits de 9 m de profondeur). Cette puissance moyenne est de -38,57 W/m. En effectuant une régression linéaire sur la courbe présentée à la figure 4.9, on trouve une pente (m) de -1,217°C. Selon la méthode graphique, la conductivité thermique du sol est de 2,52 W/mK, telle que présentée à l'équation 4.6.

$$m = \frac{\bar{q}}{4\pi k_{eq}} \Rightarrow k_{eq} = \frac{\bar{q}}{4\pi m} = \frac{-38,57 \text{ W/m}}{4\pi(-1,217^\circ\text{C})} = 2,52 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (4.6)$$

Cette valeur se compare relativement bien avec la valeur de Kim (2011) qui a déterminé que la conductivité thermique d'un site adjacent était de 2,3 W/mK.

Une fois la conductivité thermique du sol connue, il est possible d'estimer la diffusivité thermique :

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{\left(2,52 \frac{W}{mK}\right)}{\left(2300 \frac{kg}{m^3}\right) \left(1135 \frac{J}{kgK}\right)} = 9,67 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (4.7)$$

Ensuite, pour chaque pas de temps de la portion linéaire analysée, soit entre $\ln(\text{temps}) = 4,05$ et $\ln(\text{temps}) = 4,40$, une valeur de la résistance thermique du puits ($R_b(t)$) est calculée par l'expression suivante :

$$R_b(t) = \frac{T_m(t) - T_g}{\bar{q}} - \frac{m}{\bar{q}} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (4.8)$$

Où

T_m est la température moyenne du fluide à la sortie des puits 1 et 4 au temps t (°C)

T_g est la température non perturbée du sol calculée lors de l'essai de circulation continue, soit 15,91°C

m est la pente du graphique présenté à la figure 4.9, soit -1,217 °C

\bar{q} est la puissance d'extraction de chaleur par mètre linéaire, soit -38,57 W·m⁻¹

α est la diffusivité thermique du sol estimée, soit $9,67 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

r_b est le rayon d'un puits, soit 0,07 m

γ est la constante d'Euler, soit 0,5772

Ensuite, la résistance thermique équivalente du puits est obtenue en faisant la moyenne arithmétique des n_t valeurs de $R_b(t)$ calculées. Une résistance de 0,198 mK/W est obtenue.

$$\overline{R_b} = \left[\sum_{i=1}^{n_t} R_b(t) \right] \div n_t = 0,198 \frac{mK}{W} \quad (4.9)$$

Une résistance thermique équivalente du puits de 0,198 mK/W est relativement élevée par rapport à ce qui est attendu. Toutefois, le calcul théorique présenté ci-dessous, consistant à sommer la résistance du coulis, des conduites et du fluide caloporteur, mène à une résistance thermique équivalente du puits du même ordre, soit 0,203 mK/W.

Calcul théorique de la résistance thermique équivalente d'un puits :

La résistance thermique équivalente d'un puits s'exprime par l'expression suivante :

$$R_b = R_g + R_p + R_f \quad (4.10)$$

Où

R_g est la résistance thermique du coulis ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)

R_p est la résistance thermique des conduites ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)

R_g est la résistance thermique du fluide caloporteur ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)

1- Calcul de la résistance thermique des conduites (R_p) :

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_p n} = \frac{\ln\left(\frac{0,0125m}{0,0102m}\right)}{2\pi \left(0,4 \frac{W}{mK}\right) \cdot 2} = 0,0405 \frac{mK}{W} \quad (4.11)$$

Où

k_p est la conductivité thermique des conduites ($W \cdot m \cdot K$)

n est le nombre de conduites par puits (-)

2- Calcul de la résistance thermique du fluide (R_f)

2.1 - Calcul du nombre de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho v 2r_i}{\mu} = \frac{\left(1028 \frac{kg}{m^3}\right) \frac{Q}{A_i} 2(0,0102m)}{7,916 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} \quad (4.12)$$

$$Re = \frac{\left(1028 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot \left[\frac{0,31m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{1}{\pi(0,0102m)^2}\right] 2 \cdot (0,0102m)}{7,916 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 698$$

2.2 – Calcul du nombre de Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_f} = \frac{\left(7,916 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}\right) \left(3900 \frac{J}{kgK}\right)}{\left(0,45 \frac{W}{mK}\right)} = 68,61 \quad (4.13)$$

Où

k_f est la conductivité thermique du fluide caloporteur ($W \cdot m \cdot K$)

2.3 - Calcul du nombre de Nusselt (Nu) pour un écoulement laminaire ($Re < 2300$) selon la relation de Hansen :

$$Nu = 1,86 \times \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{2r_i}{L}\right)^{0,333} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (4.14)$$

Où

μ_b est la viscosité dynamique évaluée à la température moyenne du fluide ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)

μ_w est la viscosité dynamique évaluée à la température de la paroi du tuyau ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)

L est la longueur de tuyau d'un puits (m)

En supposant $\mu_b = \mu_w$, on trouve

$$Nu = 1,86 \times \left(698 \cdot 68,61 \cdot \frac{2(0,0102m)}{9m}\right)^{0,333} = 8,86$$

Selon cette relation, on utilise $Nu=4,36$ si $\left[1,86 \times \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{2r_i}{L}\right)^{0,333} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14}\right] \geq 2$. On utilise donc $Nu=4,36$ dans le cadre de cette étude.

2.4 – Calcul du coefficient de film (h_i)

$$h_i = \frac{Nu \cdot k_f}{2r_i} = \frac{4,36 \cdot \left(0,45 \frac{W}{mK}\right)}{2(0,0102m)} = 96,18 \frac{W}{m^2K} \quad (4.15)$$

2.5 – Calcul de la résistance thermique du fluide (R_f)

$$R_f = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} = \frac{1}{2(2)\pi(0,0102m) \left(96,18 \frac{W}{m^2K}\right)} = 0,0811 \frac{mK}{W} \quad (4.16)$$

3- Calcul de la résistance thermique du matériau de remplissage (R_g), en utilisant le modèle empirique de Paul (1996)

$$R_g = \frac{1}{k_g \beta_o \left(\frac{r_b}{r_o}\right)^{\beta_1}} = \frac{1}{\left(2 \frac{W}{mK}\right) (17,4427) \left(\frac{0,07m}{0,0125m}\right)^{(-0,6052)}} = \mathbf{0,0813 \frac{mK}{W}} \quad (4.17)$$

Où

k_g est la conductivité thermique du coulis ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

β_o coefficient dépendant de l'écartement entre la conduite descendante et ascendante dans le puits

β_1 coefficient dépendant de l'écartement entre la conduite descendante et ascendante dans le puits

On suppose ici que les tuyaux du tube en « U » sont en configuration B dans le puits (tel que montré à la figure 1.1).

4- Calcul de la résistance thermique équivalente du puits (R_b)

$$R_b = R_g + R_p + R_f = (0,0813 + 0,0405 + 0,0811) \frac{mK}{W} = \mathbf{0,203 \frac{mK}{W}} \quad (4.18)$$

Une étude de sensibilité est effectuée sur deux variables de l'équation 4.8, soit la température du sol T_g et la diffusivité thermique du sol. En effet, puisque la valeur de la diffusivité thermique est estimée il est important de vérifier l'influence de ce paramètre sur la valeur de R_b . Le tableau 4.5 montre qu'une variation de plus ou moins 10% de la diffusivité thermique entraîne une variation d'au plus de 1,67% de R_b . La valeur de la diffusivité thermique du sol a donc peu d'influence sur la valeur de R_b .

Tableau 4.5 : Étude de sensibilité de la diffusivité thermique

α (m ² /s)	R_b (mK/W)	% écart par rapport à R_b calculé à partir de α estimée
Valeur estimée -10% = 8,70E-07	0,202	1,67
Valeur estimée = 9,67E-07	0,198	0,00
Valeur estimée + 10% = 1,06E-06	0,195	1,52

La valeur de la température du sol non perturbé T_g influence cependant la valeur de R_b de façon non négligeable. À titre de rappel, cette température est obtenue en effectuant la moyenne des températures enregistrées par les sondes localisées à la sortie du puits 1 et à l'entrée et sortie du puits 4 lors de l'essai de circulation continue. L'incertitude des sondes de température PT-100 est de plus ou moins $0,5^\circ\text{C}$. Ainsi, le tableau 4.6 montre qu'une telle variation de la température du sol non perturbé entraîne une variation de 6,57% de la valeur de R_b .

Tableau 4.6 : Étude de sensibilité de la température non perturbée du sol

T_g ($^\circ\text{C}$)	R_b (mK/W)	% écart par rapport à R_b calculé à partir de $T_g=15,91^\circ\text{C}$
$T_g + 0,5^\circ\text{C} = 16,41^\circ\text{C}$	0,185	6,57
$T_g = 15,91^\circ\text{C}$	0,198	0,00
$T_g - 0,5^\circ\text{C} = 15,41^\circ\text{C}$	0,211	6,57

4.5 Résumé du chapitre

Le test de réponse thermique réalisé a donc dû être adapté aux puits de faible profondeur. En effet, le test a été réalisé sur la branche 1 en entier afin d'observer un écart de température suffisant, soit près de $3,5^\circ\text{C}$, pour pouvoir traiter les données par la méthode graphique. Dans un deuxième temps, étant donné la longueur non négligeable des conduites horizontales liant les puits verticaux de la branche 1, soit environ 11% de la longueur totale des trois puits utilisés, le transfert thermique dans ces conduites horizontales a été modélisé à l'aide de TYPE952 dans l'environnement de simulation TRNSYS. L'écart de température dans ces conduites horizontales, de l'ordre de $0,5^\circ\text{C}$, a été utilisé pour corriger l'écart de température du fluide entre la sortie du puits 1 et la sortie du puits 4 afin de n'obtenir que l'écart de température dans la portion verticale des puits étudiés pour ce test de réponse thermique. L'analyse par la méthode graphique a permis de déterminer des propriétés du sol qui se comparent bien avec les résultats obtenus lors d'expériences menées précédemment sur ce même site expérimental. Une conductivité thermique du sol de $2,52 \text{ W/mK}$, une diffusivité thermique de $9,67 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et une résistance thermique du puits de $0,198 \text{ W/mK}$ ont été obtenues. Ces paramètres sont imposés au TYPE273 afin de simuler le fonctionnement du système géothermique. La comparaison entre les résultats expérimentaux et simulés est présentée au chapitre 5.

CHAPITRE 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

5.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la présentation et l'analyse des données expérimentales collectées entre le 10 novembre 2011 et le 30 avril 2012 au centre de recherche d'Électricité de France (EDF) sur le site des Renardières à Moret-sur-Loing, France. Dans un premier temps, les différents points de mesure sont présentés suivi d'une description de la méthodologie associée au traitement de données. Ensuite, les données expérimentales sont analysées et finalement, les données générées par le TYPE273 sont comparées aux données expérimentales.

5.2 Présentation des points de mesure

Un total de 40 mesures expérimentales sont collectées à toutes les 10 secondes. Ces points de mesure sont décrits au tableau 5.1. L'instrumentation du site expérimental est décrite à la section 3.5 de ce mémoire. Voici un bref rappel.

La figure 5.1 illustre la géométrie du champ de puits étudié ainsi que l'emplacement des 10 sondes de mesure de la température intrusive du fluide à l'entrée et/ou sortie des premiers et derniers puits de chacune des 4 branches de puits.

Les 40 mesures expérimentales regroupent :

- 3 mesures de température du sol non perturbé prises à 1, 5 et 20 mètres de profondeur à quelques mètres du site expérimental, soit «T réf-1m», «Tsol 5m» et «Tsol 20m»;
- 4 mesures de température dans le puits d'instrumentation (voir figure 5.2);
- 12 mesures de température de la paroi des tubes ascendants et descendants des puits 1 et 4 (voir figure 5.3);
- 10 mesures de température intrusive du fluide à l'entrée et/ou sortie des premiers et derniers puits de chacune des 4 branches de puits (voir figure 5.1);

- 4 mesures météorologiques, soit l'humidité relative de l'air, la température extérieure, l'ensoleillement et la pluviométrie;
- 6 mesures concernant la PAC, soit les températures à l'entrée et la sortie du condenseur et de l'évaporateur, l'énergie thermique fournie par la PAC et l'énergie consommée par le circulateur et le compresseur de la PAC;
- 1 mesure de débit d'eau glycolée circulant dans le circuit géothermique.

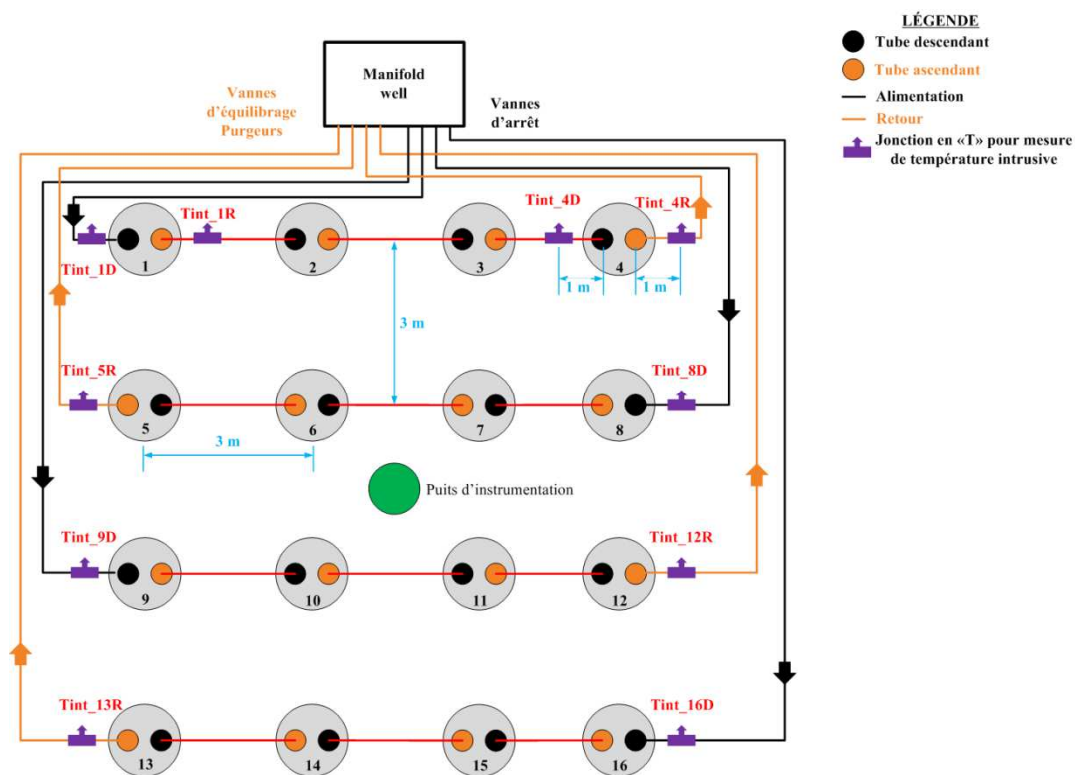


Figure 5.1 : Géométrie du champ de puits étudié

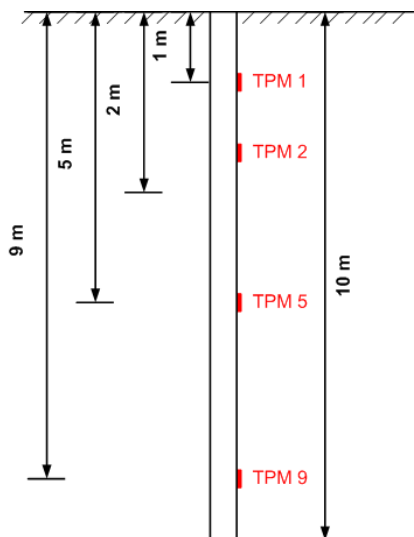


Figure 5.2 : Mesures de température dans le puits d'instrumentation

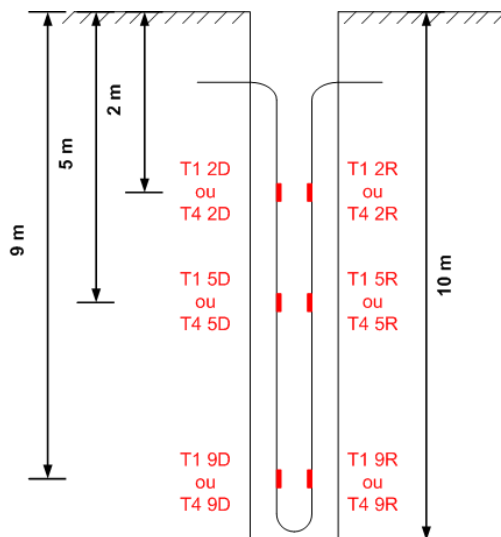


Figure 5.3 : Mesures de température de la paroi des tubes ascendants et descendants des puits 1 et 4

Il est à noter que les mesures de température du sol ou du fluide ont été effectuées à l'aide de sondes PT-100 dont l'incertitude sur la température absolue est de $0,1^{\circ}\text{C}$. L'incertitude sur la sonde mesurant la température extérieure est de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. L'intégrateur d'énergie a une précision de 1% et est associé à deux sondes PT-100 de classe A dont la précision est 0,2% ainsi qu'un compteur à impulsion d'une précision de 2%. Le débitmètre possède une précision de 0,5%.

Tableau 5.1 : Description des points de mesure

Paramètre	Définition	Unité
T ref-1m	Température lue par la sonde de référence de 1m de profondeur	°C
TPM 1	Température dans le puits d'instrumentation à 1 m de profondeur	°C
TPM 2	Température dans le puits d'instrumentation à 2 m de profondeur	°C
TPM 5	Température dans le puits d'instrumentation à 5 m de profondeur	°C
TPM 9	Température dans le puits d'instrumentation à 9 m de profondeur	°C
T1 2D	Température de la paroi du tube descendant du puits 1 à 2 m de profondeur	°C
T1 5D	Température de la paroi du tube descendant du puits 1 à 5 m de profondeur	°C
T1 9D	Température de la paroi du tube descendant du puits 1 à 9 m de profondeur	°C
T1 2R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 1 à 2 m de profondeur	°C
T1 5R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 1 à 5 m de profondeur	°C
T1 9R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 1 à 9 m de profondeur	°C
T4 2D	Température de la paroi du tube descendant du puits 4 à 2 m de profondeur	°C
T4 5D	Température de la paroi du tube descendant du puits 4 à 5 m de profondeur	°C
T4 9D	Température de la paroi du tube descendant du puits 4 à 9 m de profondeur	°C
T4 2R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 4 à 2 m de profondeur	°C
T4 5R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 4 à 5 m de profondeur	°C
T4 9R	Température de la paroi du tube ascendant du puits 4 à 9 m de profondeur	°C
T int 1D	Température intrusive (du fluide) à l'entrée du puits 1	°C
T int 1R	Température intrusive (du fluide) à la sortie du puits 1	°C
T int 4D	Température intrusive (du fluide) à l'entrée du puits 4	°C
T int 4R	Température intrusive (du fluide) à la sortie du puits 4	°C
T int 5R	Température intrusive (du fluide) à la sortie du puits 5	°C
T int 8D	Température intrusive (du fluide) à l'entrée du puits 8	°C
T int 9D	Température intrusive (du fluide) à l'entrée du puits 9	°C
T int 12 R	Température intrusive (du fluide) à la sortie du puits 12	°C
T int 13 R	Température intrusive (du fluide) à la sortie du puits 13	°C
T int 16 D	Température intrusive (du fluide) à l'entrée du puits 16	°C
Tsol 5m	Température lue par la sonde de référence de 5 m de profondeur	°C
Tsol 20m	Température lue par la sonde de référence de 20 m de profondeur	°C
HR	Humidité relative	%
T_EXT	Température extérieure	°C
Pyra	Ensoleillement	W/m ²
Pluie	Pluviométrie	mm
E-O-5	Température du fluide à l'entrée du condenseur	°C
S-O-5	Température du fluide à la sortie du condenseur	°C
E-CAP-5	Température du fluide à l'entrée des capteurs (sortie évaporateur)	°C
S-CAP-5	Température du fluide à la sortie des capteurs (entrée évaporateur)	°C
DEB-CAP_5	Débit d'eau glycolée circulant dans le champ géothermique	m ³ h ⁻¹
ETH P5	Énergie thermique fournie par la PAC	kWh
ELEC P5	Énergie consommée par le circulateur et le compresseur de la PAC	kWh

5.3 Méthodologie associée au traitement de données

Les 40 mesures expérimentales sont collectées toutes les 10 secondes et transmises à un système d'acquisition localisé dans la plate-forme Climat naturel. À chaque semaine, un technicien d'EDF assigné à ce site expérimental traite les données recueillies afin de les moyenner sur 1 minute et crée un fichier regroupant les données hebdomadaires. Au bout d'un mois, les fichiers hebdomadaires d'un même mois sont transmis à Marilyne Rancourt-Ouimet via internet. Cette dernière copie les fichiers hebdomadaires originaux dans un dossier nommé «Réception DATA EDF» afin de conserver une copie originale de chacun des fichiers. Marilyne Rancourt-Ouimet crée ensuite un fichier excel portant le nom du mois à traiter et y copie le contenu des fichiers hebdomadaires reçus pour ledit mois. Dès le premier mois, un fichier de compilation a été créé. Celui-ci regroupera éventuellement toutes les données expérimentales recueillies. Ce fichier est simplement créé en copiant/collant les données d'un fichier mensuel à la suite du mois précédant. Plusieurs figures sont créées dans ce fichier de compilation afin d'analyser l'évolution des différents paramètres présentés au tableau 5.1. En analysant les données au fur et à mesure, il est possible de noter les anomalies et de les signaler à l'équipe d'EDF afin que la situation soit rectifiée pour le mois suivant.

Compte tenu du grand nombre de données à traiter et des nombreuses opérations de copier/coller, un processus de vérification a été mis en place afin de vérifier qu'aucune erreur ne se soit glissée. Ce processus est appliqué à la création des fichiers mensuels à partir des fichiers hebdomadaires envoyés par EDF ainsi qu'à la création du fichier de compilation à partir des fichiers mensuels.

Pour la vérification des fichiers mensuels, chaque fichier hebdomadaire original est copié dans une feuille d'un classeur excel nommé comme suit «Mois Année_verification.xlsx». Le fichier mensuel à vérifier est également copié dans une feuille du classeur excel nommé comme suit «Mois Année_verification.xlsx». La vérification consiste à faire la somme des données d'une ligne et de répéter l'opération pour chacune des lignes d'un fichier hebdomadaire. Ensuite, la somme de la somme des lignes est calculée et transférée dans un tableau comparatif sous le nom «Somme lignes» pour une semaine. La même opération est effectuée pour les données d'une colonne et la somme de la somme des colonnes est calculée et transférée dans le tableau comparatif sous le nom «Somme colonnes» pour une semaine. Le tableau 5.2 présente un

exemple de vérification pour la création du fichier regroupant les données expérimentales du mois de Janvier 2012.

Tableau 5.2 : Tableau comparatif pour la vérification de la création du fichier mensuel regroupant les données expérimentales de Janvier 2012

	EDF		DATA traitées	
	Somme lignes	Somme colonnes	Somme lignes	Somme colonnes
Semaine 1	27 423 905,76	27 423 905,76	136 732 656,61	136 732 656,61
Semaine 2	30 505 471,84	30 505 471,84		
Semaine 3	34 695 192,26	34 695 192,26		
Semaine 4	38 764 119,08	38 764 119,08		
Semaine 5	5 343 967,68	5 343 967,68		
	136 732 656,61	136 732 656,61		

L'opération décrite au paragraphe précédent est répétée pour chaque feuille représentant un fichier hebdomadaire original ainsi que pour le fichier mensuel à vérifier. Il est possible de confirmer qu'aucune donnée n'est manquante ou dédoublée lorsque, d'une part, la valeur dans «Somme lignes» est égale à la valeur retrouvée dans la cellule «Somme colonnes» pour une même semaine et, d'autre part, lorsque la somme des cellules «Somme lignes» tirées des fichiers hebdomadaires envoyés par EDF correspond à la somme des lignes du fichier mensuel assemblé par Marilyne Rancourt-Ouimet (côté DATA traitées du tableau 5.2) et de même pour la somme des colonnes. Les fichiers de vérification confirment qu'aucune erreur de copier/coller ne s'est glissée lors de la création des fichiers mensuels.

Pour la vérification du fichier de compilation, la procédure est identique à l'exception que plutôt de comparer des fichiers hebdomadaires fournis par EDF, chaque fichier mensuel est copié dans une feuille d'un classeur excel nommé «Compilation - Nov-avril_verification.xlsx». Le fichier de compilation totale est également copié dans une feuille du classeur excel nommé «Compilation - Nov-avril_verification.xlsx». Le tableau 5.3 montre le tableau comparatif pour la vérification de la création du fichier de compilation à partir des fichiers mensuels. Ce fichier de vérification confirme qu'aucune erreur de copier/coller ne s'est glissée lors de la création du fichier de compilation.

Tableau 5.3 : Tableau comparatif pour la vérification de la création du fichier de compilation regroupant les données expérimentales de Novembre 2011 à Avril 2012

	Compilation mensuelle		Compilation totale	
	Somme lignes	Somme colonnes	Somme lignes	Somme colonnes
Novembre	25 500 701,72	25 500 701,72	468 126 652,44	468 126 652,44
Décembre	88 177 684,34	88 177 684,34		
Janvier	136 732 656,61	136 732 656,61		
Février	67 904 673,58	67 904 673,58		
Mars	79 101 901,14	79 101 901,14		
Avril	70 709 035,05	70 709 035,05		
	468 126 652,44	468 126 652,44		

5.4 Analyse des données expérimentales

Cette section présente l'analyse de l'évolution des différents paramètres décrits au tableau 5.1 entre le 10 novembre 2011 et le 30 avril 2012 à l'aide de différentes figures.

5.4.1 Évolution de la température extérieure

La figure 5.4 présente la température de non-chauffage, fixée à 12°C, ainsi que l'évolution de la température extérieure. Il est possible de noter certaines déviations ponctuelles importantes, soit des valeurs de température très hautes ou très faibles. L'équipe d'EDF a indiqué que la sonde de température extérieure a fait défaut avant les vacances de Noël, soit un peu après 800 heures de fonctionnement. En janvier, le problème semblait être réglé, cependant l'analyse de l'évolution de la température extérieure permet de déterminer que la température extérieure varie entre -41,35°C et 203,48°C sur la période étudiée et que la valeur de la température extérieure atteint des valeurs inférieures à -15°C à 260 reprises et supérieures à 25°C à 18 reprises, et ce, même après le mois de janvier où le problème était censé être réglé. Toutefois, outre ces 278 déviations ponctuelles, la température extérieure évolue entre -13°C et 24°C.

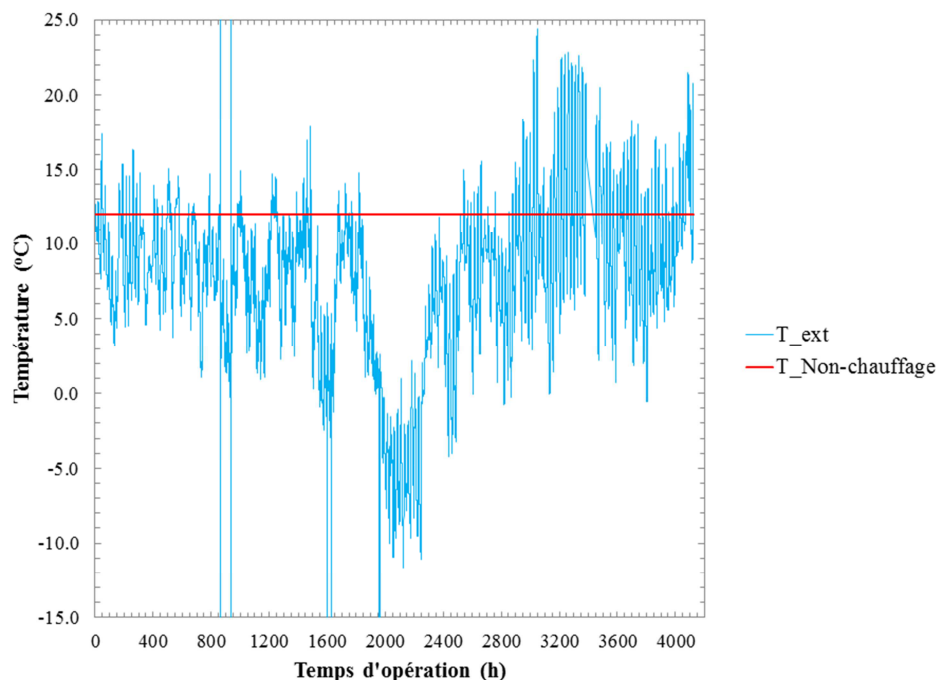


Figure 5.4 : Évolution de la température extérieure

Il est intéressant de comparer la température extérieure mesurée au Centre de recherche des Renardières à celles enregistrées à Melun-Villaroche entre 1961 et 1990 (Infoclimat, 2012). Cette station météo, située à environ 50 km au nord-ouest du Centre de recherche des Renardières, est la station météo la plus proche pour laquelle les archives sont disponibles.

La figure 5.5 présente la comparaison des moyennes mensuelles de la température extérieure mesurée aux Renardières entre novembre 2011 et avril 2012 et celles provenant des archives de la station météo Melun-Villaroche. Il est à noter que le calcul des températures extérieures moyennes mensuelles pour les mois de novembre 2011 à avril 2012 exclut les 278 déviations ponctuelles mentionnées plus haut.

En observant la figure 5.5, il est d'abord possible de remarquer que les températures recensées à Melun-Villaroche fluctuent, au plus, entre -20°C et 16°C pour les mois étudiés. Cela représente une plage de 36°C . En ce qui concerne la température extérieure mesurée aux Renardières entre novembre 2011 et avril 2012, tel que montré à la figure 5.4, elle évolue sur une plage de 37°C , mais 7°C au-dessus des valeurs moyennes de Melun, soit entre -13°C et 24°C .

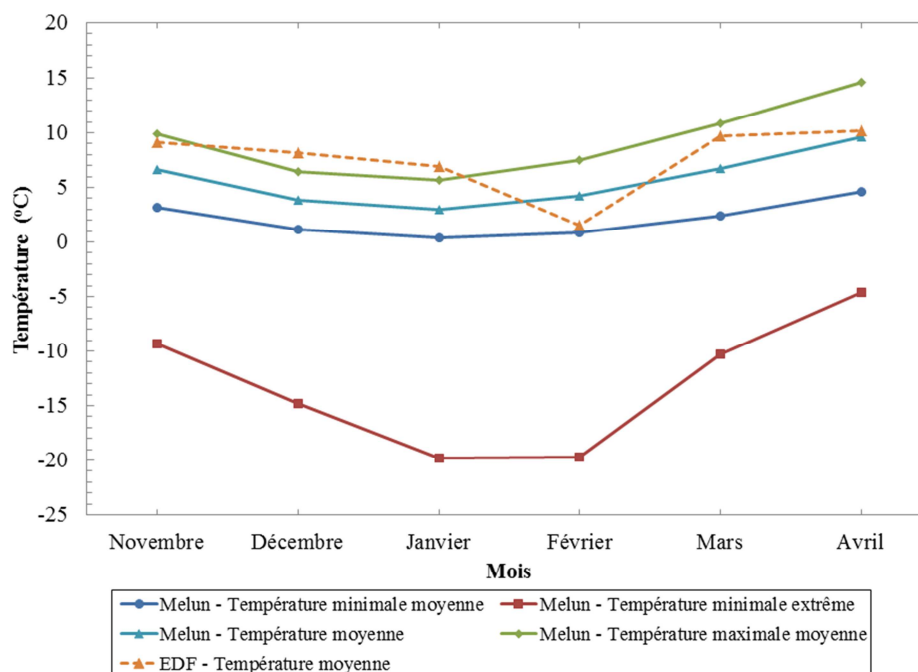


Figure 5.5 : Comparaison des moyennes mensuelles de la température extérieure mesurée aux Renardières et celles provenant des archives de la station météo Melun-Villaroche

En comparant les moyennes mois par mois, il est possible de remarquer que les moyennes mensuelles obtenues à partir des données mesurées chez EDF se situent entre les courbes de la température minimale moyenne et de la température maximale moyenne tirées des archives de Melun-Villaroche, à l'exception des mois de décembre et janvier qui présentent des températures moyennes mensuelles supérieures à la courbe de température maximale moyenne. De plus, les six mois étudiés présentent des moyennes mensuelles supérieures à la courbe de la température moyenne tirée des archives de Melun-Villaroche, à l'exception du mois de février pour lequel la température moyenne d'EDF est inférieure à la courbe des températures moyennes de Melun et très près de la courbe de température minimale moyenne.

5.4.2 Évolution des températures de référence et du puits d'instrumentation

En observant la figure 5.6, il est possible de remarquer que la température dans le puits d'instrumentation à 1 m de profondeur (TPM – 1m) suit la même allure que la température de référence à 1 m de profondeur ($T_{\text{réf.}} - 1 \text{ m}$), mais présente un décalage moyen d'environ $0,7^{\circ}\text{C}$ inférieure à celle-ci. L'écart RMS entre les deux courbes à 1 m de profondeur est de $0,86^{\circ}\text{C}$.

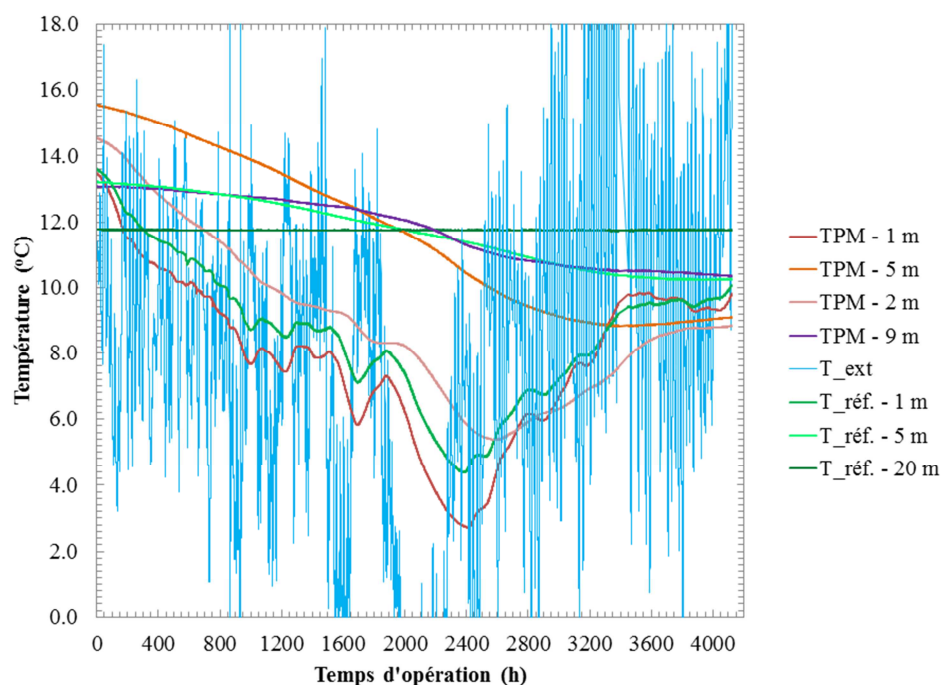


Figure 5.6 : Évolution des températures de référence et du puits d'instrumentation

La température dans le puits d'instrumentation à 2 m de profondeur (TPM – 2m) suit grossièrement la même allure que les températures à 1 m de profondeur jusqu'au début du mois de mars (heure 2672) en étant en moyenne $1,1^{\circ}\text{C}$ au-dessus de $T_{\text{réf.}} - 1 \text{ m}$ et $2,1^{\circ}\text{C}$ au-dessus de TPM – 1 m. À partir du mois de mars, la température à 2 mètres de profondeur atteint des valeurs inférieures de 1°C en moyenne sous $T_{\text{réf.}} - 1 \text{ m}$ et de $0,8^{\circ}\text{C}$ en moyenne sous TPM – 1 m.

De plus, la température dans le puits d'instrumentation à 9 m de profondeur (TPM – 9m) et la température de référence à 5 m de profondeur ($T_{\text{réf.}} - 5 \text{ m}$) sont très similaires tout au long de la période étudiée. En effet, l'écart RMS n'est que de $0,16^{\circ}\text{C}$. La température dans le puits d'instrumentation à 5 m de profondeur (TPM – 5m) ne suit toutefois pas la courbe de température de référence à 5 m de profondeur.

Finalement, la température de référence à 20 m ($T_{\text{réf.}} - 20 \text{ m}$) est quasi constante à environ 12°C tout au long de la période étudiée. Cette valeur est inférieure à la température du sol non perturbé déterminée par l'essai de circulation continue en octobre 2011, soit $15,91^{\circ}\text{C}$.

Il ressort de cette analyse que la température sur la hauteur des puits varie de façon relativement importante lors de la période d'essai. Par exemple, la valeur de TPM-5m baisse d'environ 5°C entre le début et la fin des essais. De plus, ces mesures mettent en lumière le fait qu'il y a sans doute des inhomogénéités dans le sol ou d'importantes imprécisions dans les mesures puisque deux mesures prises à la même profondeur montrent des différences significatives.

5.4.3 Évolution des températures de la paroi à 2, 5 et 9 m dans le tuyau descendant et ascendant du puits 1

En observant la figure 5.7, il est possible de noter que jusqu'à environ 1600 h d'opération, plus le point de mesure est près de la surface, plus la température à la paroi est élevée. Ce qui est peu commun pour un sol en période hivernale. De plus, la sonde mesurant la température de la paroi à 2 m de profondeur semble faire défaut à partir du mois de mars où la température augmente de façon importante jusqu'à atteindre des températures supérieures à 1000°C au cours du mois d'avril.

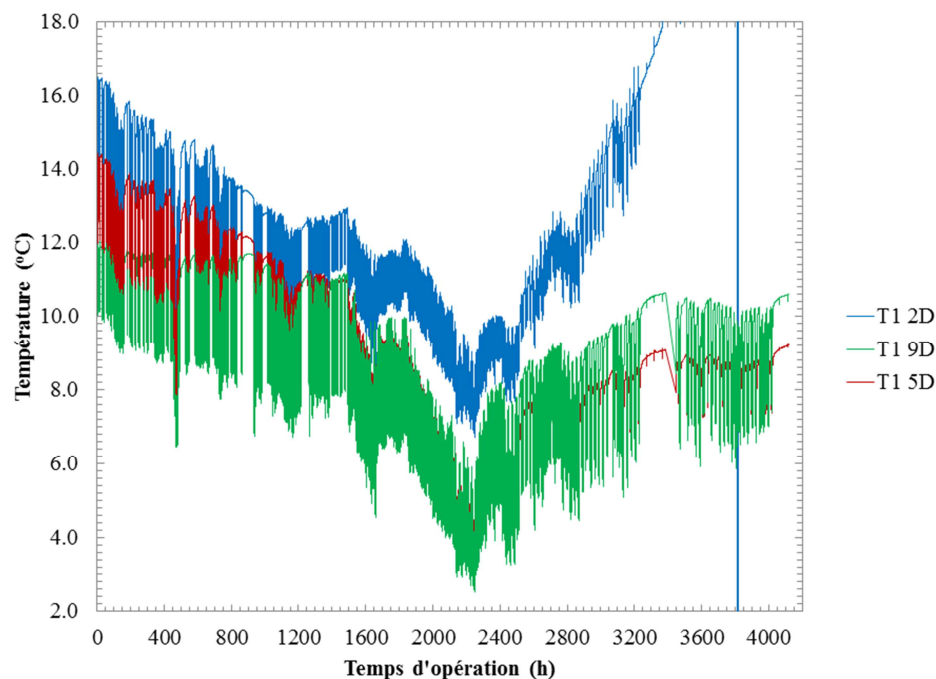


Figure 5.7 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube descendant du puits 1

En observant la figure 5.8, il est possible de remarquer que dans le tuyau ascendant du puits 1, les températures de la paroi à 5 m et 9 m de profondeur suivent une tendance similaire à ce qui se produit dans le tuyau descendant (figure 5.7). Toutefois, la température à 2 m de profondeur se retrouve entre la température enregistrée à 5 et 9 m de profondeur, ce qui semble anormal. Il est à noter qu'il est soupçonné que le puits 1 soit mal construit (présence de poches d'air donc isolation thermique du puits) et donc que les valeurs mesurées dans ce puits soient peu significatives. Le lecteur est référé à la section 3.6 de ce mémoire pour plus d'explications concernant les problèmes rencontrés lors de la construction.

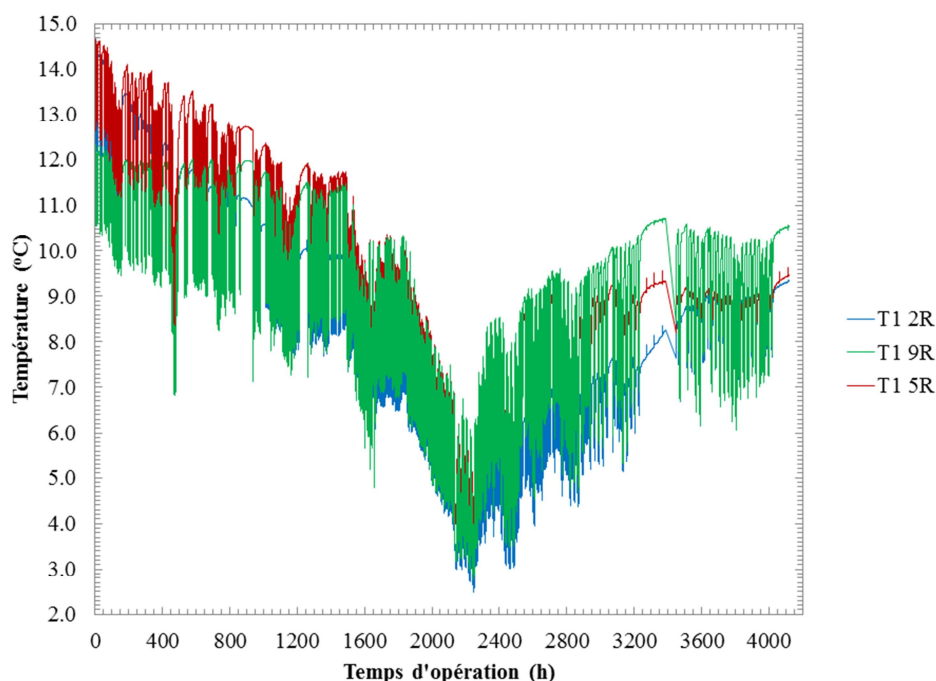


Figure 5.8 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube ascendant du puits 1

5.4.4 Évolution des températures de la paroi à 2, 5 et 9 m dans le tuyau descendant et ascendant du puits 4

Les figures 5.9 et 5.10 présentent l'évolution des températures de la paroi à 2, 5 et 9 m dans le tuyau descendant et ascendant du puits 4 respectivement. Il est possible de remarquer que ces températures évoluent de façon similaire. Il est à noter que, contrairement au puits 1, plus le point de mesure est près de la surface, plus la température à la paroi est faible. En hiver, ce

comportement est plutôt celui qui est attendu, soit que la température du sol en profondeur soit supérieure à celle en surface.

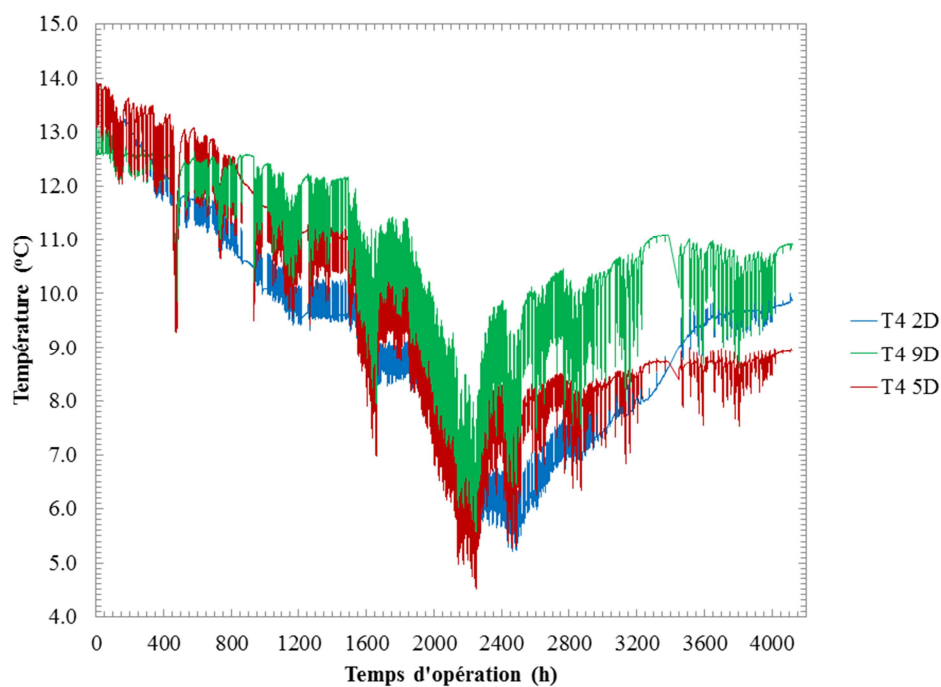


Figure 5.9 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube descendant du puits 4

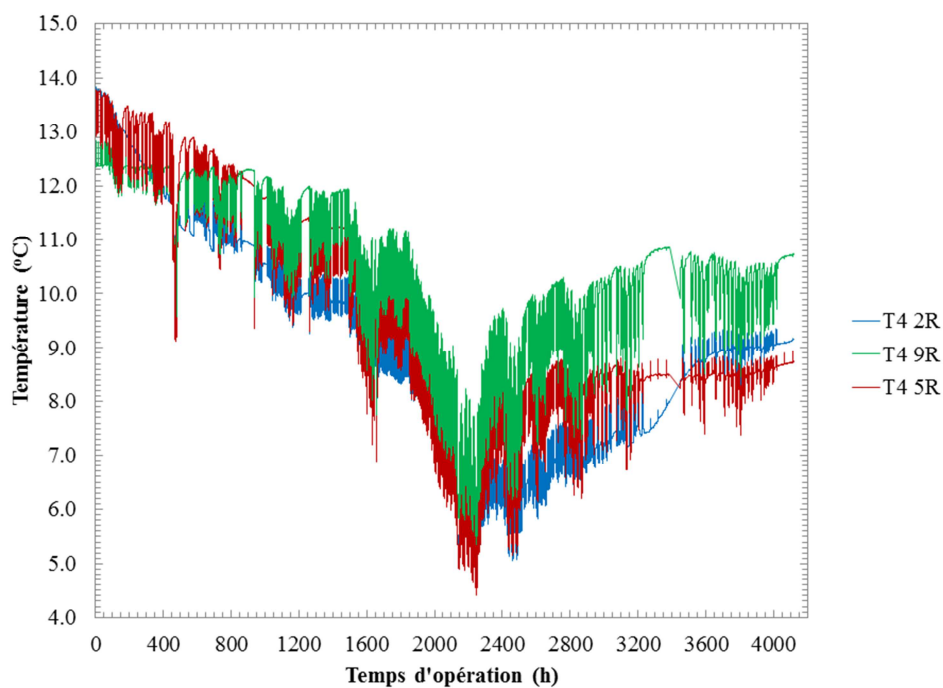


Figure 5.10 : Évolution des températures de la paroi à 2, 5, et 9 m de profondeur dans le tube ascendant du puits 4

5.4.5 Évolution des températures intrusives du fluide dans les 4 branches

La figure 5.11 illustre l'évolution des températures intrusives du fluide mesurées à l'entrée et à la sortie de chacun des puits 1 et 4. Les courbes bleu foncé et bleu pâle représentent la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits 1, respectivement. Les courbes violet et rouge représentent la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits 4, respectivement. Tel qu'attendu, la température du fluide est la plus faible à l'entrée du puits 1 (Tint-1D) puis elle augmente en circulant à travers la branche 1 jusqu'à atteindre la température la plus élevée à la sortie du puits 4 (Tint-4R).

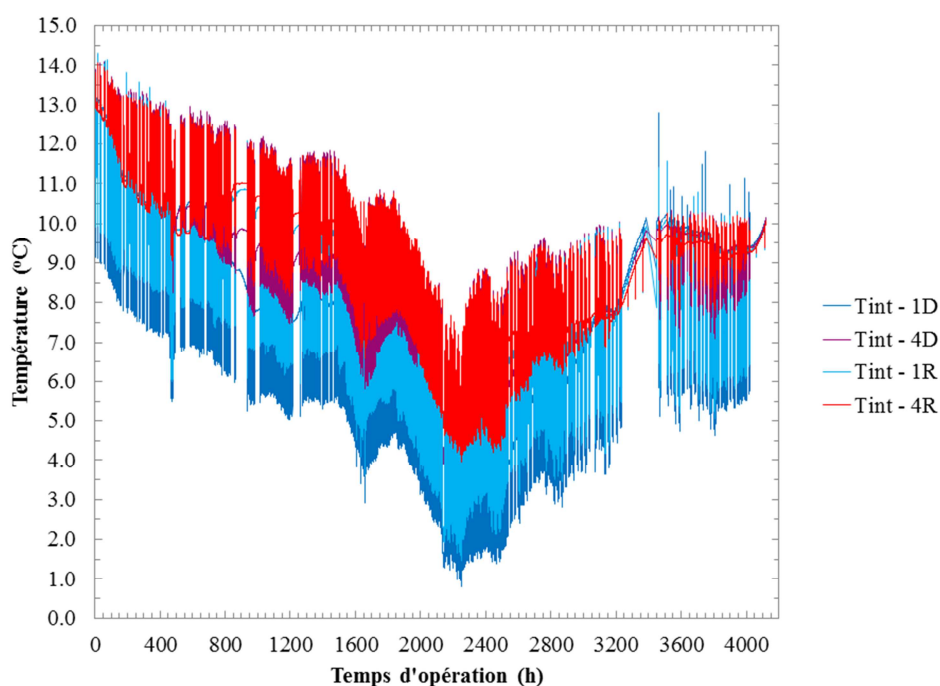


Figure 5.11 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 1

Pour les figures 5.12 à 5.14 inclusivement, la courbe bleue représente la température du fluide à l'entrée de la branche et la rouge représente la température du fluide à la sortie de la branche. Dans les trois cas, la courbe de température du fluide à l'entrée de la branche suit la même allure que la courbe de température du fluide à la sortie, celle-ci étant quelques degrés plus élevée que la courbe de température à l'entrée. En comparant les figures, il est possible de noter que l'évolution dans les trois branches prennent place à l'intérieur d'une plage de température semblable. Finalement, il est intéressant de remarquer que la température de retour du fluide à la PAC (Tint_#R) varie entre des températures de 3,96°C et 14,07 °C, 3,51°C et 14,79°C, 3,50°C et

14,68°C puis 3,71°C et 14,83°C pour les branches 1 à 4, respectivement. Ces plages de températures de retour sont toutes au-dessus de la température minimale de retour que peut supporter la PAC, soit environ -6°C. En observant ces résultats, il est possible d'avancer que le système est probablement sur-dimensionné, car même les températures de retour minimum observées sont nettement supérieures à ce que la PAC peut tolérer.

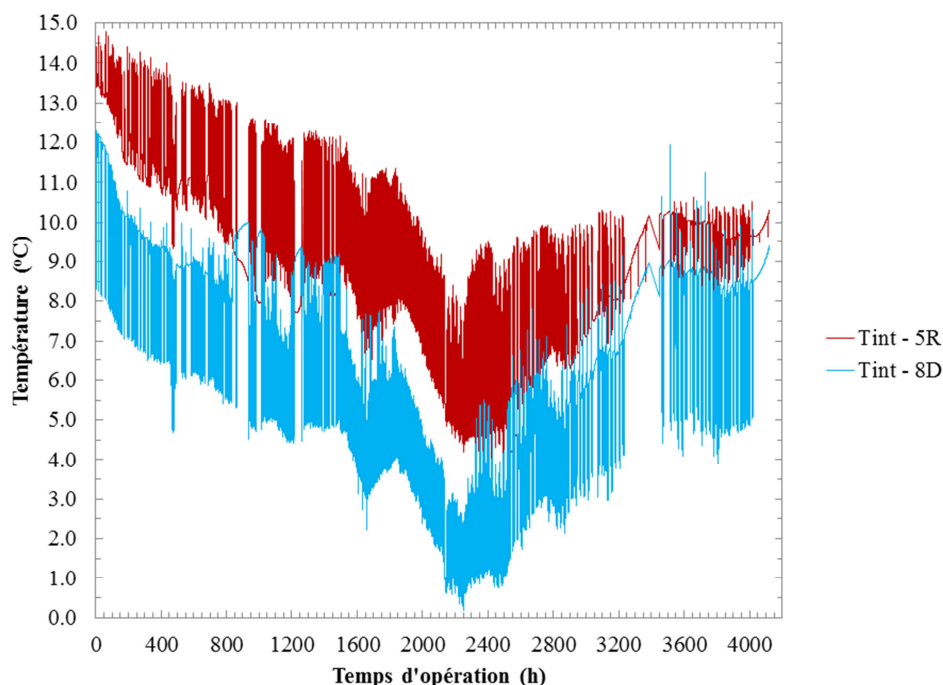


Figure 5.12 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 2

Il est à noter que, tel que présenté à la section 3.5 de ce mémoire, la sonde de température au puits 8 a subi un bris lors de l'installation. Suite au test réalisé au démarrage du système, cette sonde semble indiquer des résultats environ 1°C inférieurs à la valeur qui devrait être mesurée.

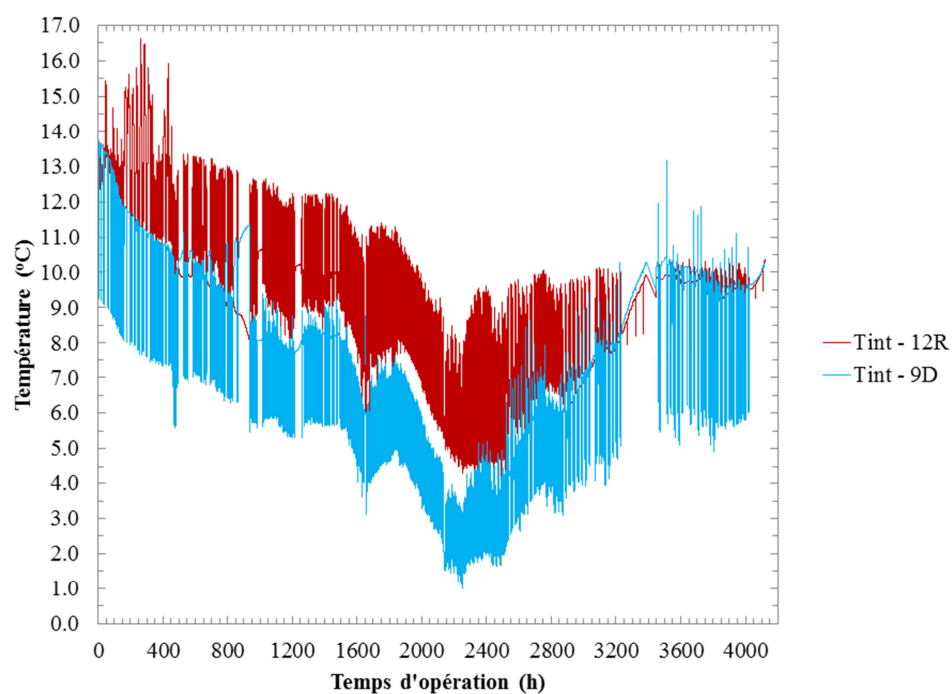


Figure 5.13 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 3

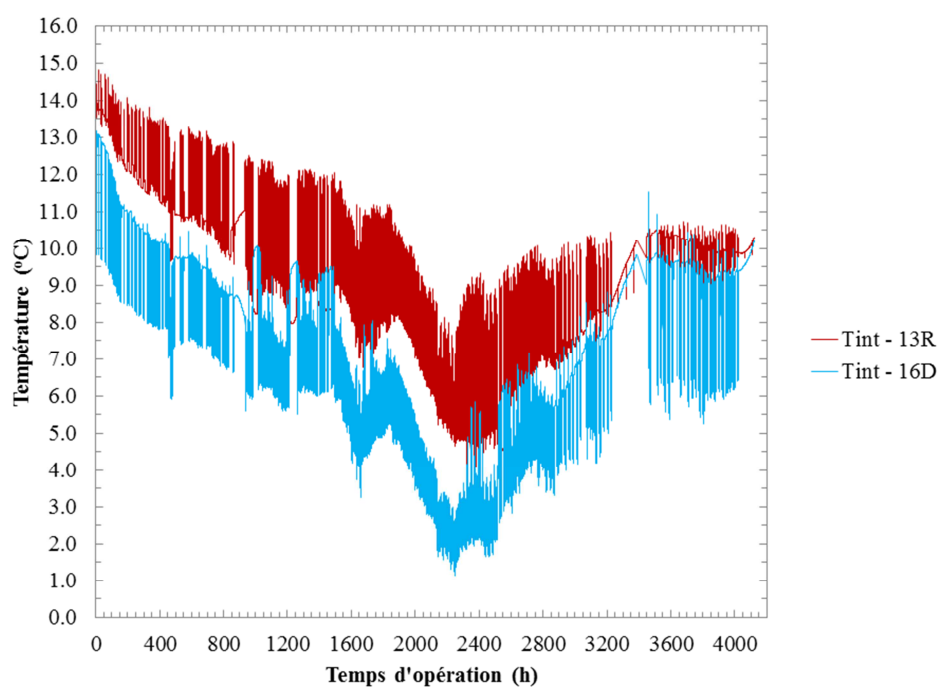


Figure 5.14 : Évolution des températures intrusives du fluide dans la branche 4

5.4.6 Évolution des températures intrusives du fluide de quatre couples de puits thermiquement symétriques

Les figures 5.15 à 5.18 présentent l'évolution de la température intrusive de quatre couples de puits thermiquement symétriques, soit les puits 1 & 16, 8 & 9, 5 & 12 et 4 & 13. Il est possible de remarquer que pour un couple de puits subissant une influence thermique similaires de la part des puits voisins, l'évolution de la température du fluide est très proche et que les courbes bleue et rouge suivent la même allure. L'écart RMS entre les deux courbes a été calculé pour chacun des couples et la valeur est indiquée sous chacune des quatre figures. Ce dernier est plutôt faible pour les cas présentés aux figures 5.15, 5.17 et 5.18. Toutefois, pour la figure 5.16, présentant l'évolution de la température du fluide dans les puits 8 et 9, l'écart RMS est de $1,16^{\circ}\text{C}$. Cette valeur, plus élevée que les trois autres, s'explique par le fait que la sonde de mesure de température intrusive à l'entrée du puits 8 est défectueuse, tel qu'expliqué plus haut. En observant cette figure, on remarque que si la température indiquée par Tint-8D était 1°C supérieur, les deux courbes seraient presque confondues.

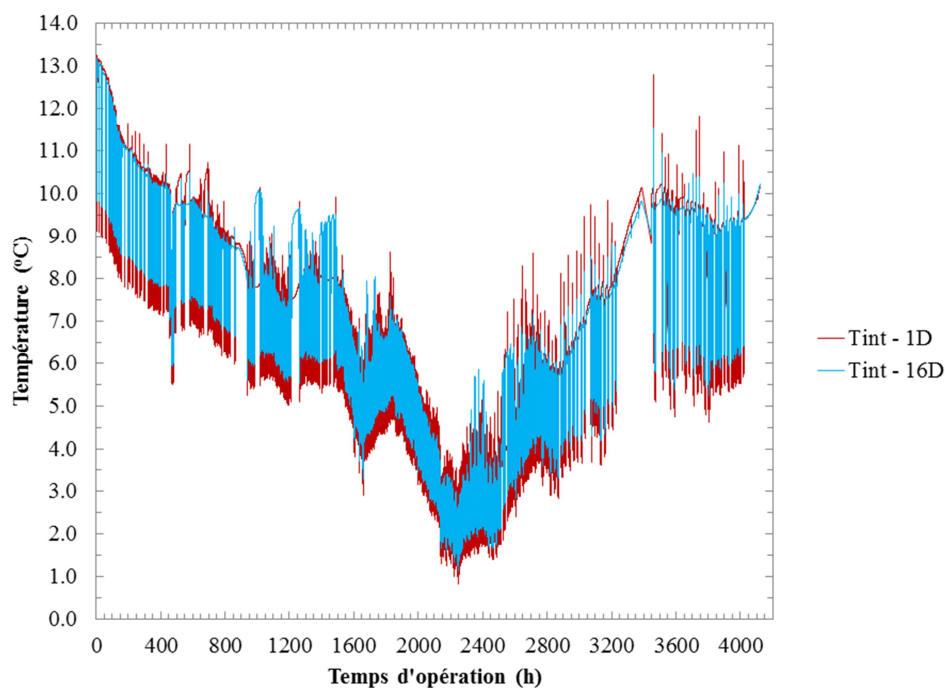


Figure 5.15 : Évolution de la température intrusive à l'entrée des puits 1 et 16

L'écart RMS entre les deux courbes de la figure 5.15 est égal à $0,54^{\circ}\text{C}$.

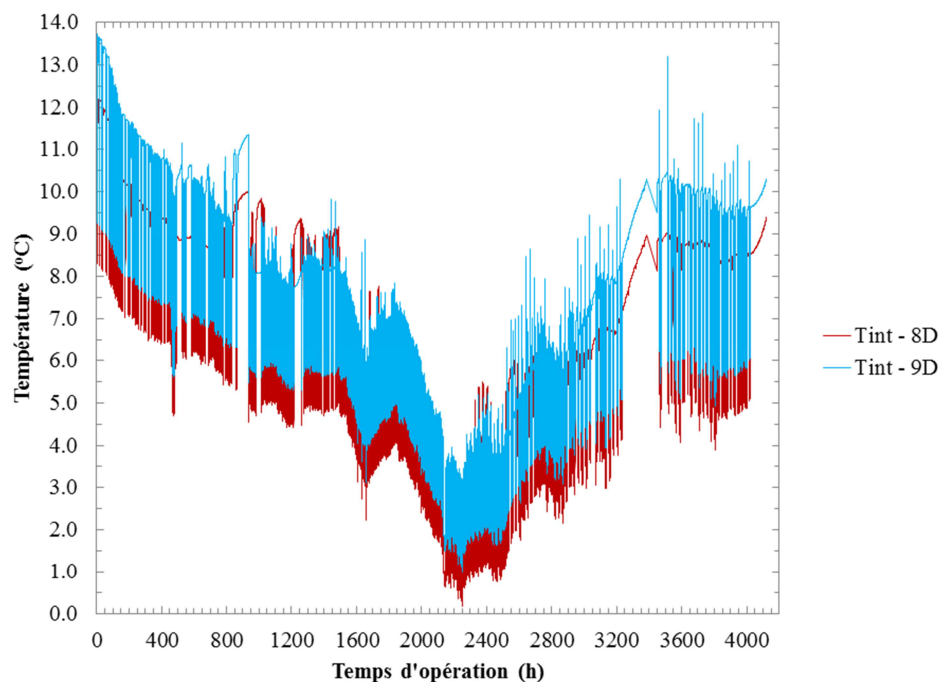


Figure 5.16 : Évolution de la température intrusive à l'entrée des puits 8 et 9

L'écart RMS entre les deux courbes de la figure 5.16 est égal à $1,16^{\circ}\text{C}$.

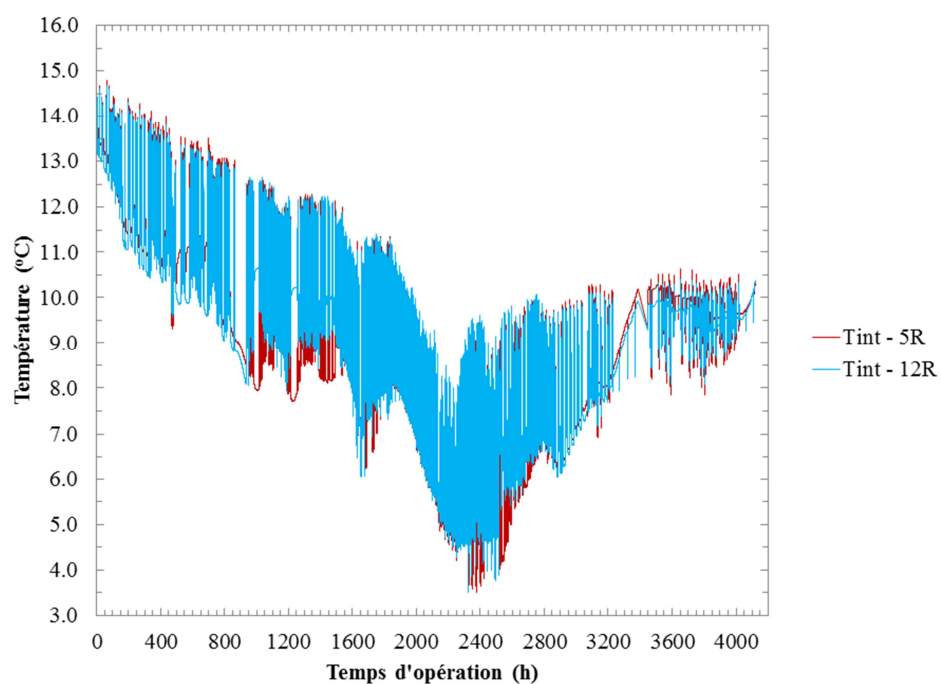


Figure 5.17 : Évolution de la température intrusive à la sortie des puits 5 et 12

L'écart RMS entre les deux courbes de la figure 5.17 est égal à $0,60^{\circ}\text{C}$.

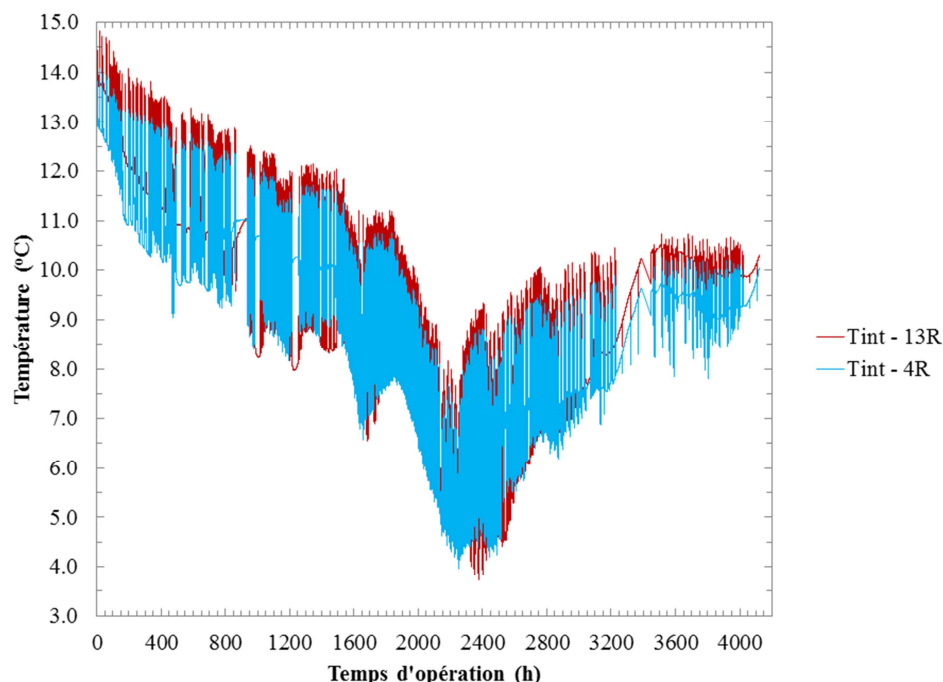


Figure 5.18 : Évolution de la température intrusive à la sortie des puits 4 et 13

L'écart RMS entre les deux courbes de la figure 5.18 est égal à 0,79°C.

5.4.7 Évolution du débit de circulation

La figure 5.19 présente l'évolution du débit de circulation dans le champ de puits géothermiques au cours de la période étudiée. Il est possible de remarquer que le débit varie principalement entre deux plateaux, soit 0 m³/h (PAC à l'arrêt) et environ 0,80 m³/h lorsque la PAC fonctionne en continu pendant un certain temps.

Les points situés entre ces deux plateaux s'expliquent par le fait que les données expérimentales sont recueillies aux 10 secondes puis moyennées sur une minute et lorsque la PAC fonctionne pendant moins d'une minute, le débit converti en m³/h est inférieur au débit lorsque la PAC fonctionne en continu. De plus, l'observation de la figure 5.19 permet de remarquer une période où il manque des données au début d'avril. Cela est dû à un problème affectant le système d'acquisition de données et menant à la perte des données entre le 30 mars 19h36 (heure 3387,3) et le 2 avril 9h30 (heure 3449,2).

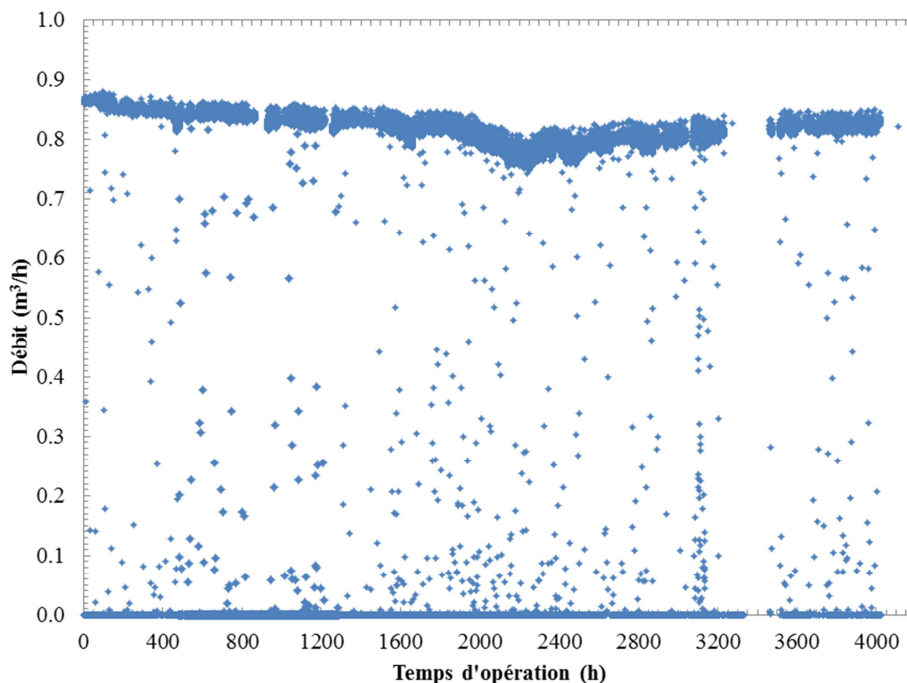


Figure 5.19 : Évolution du débit de fluide circulant dans le système géothermique

L'outil présenté à l'annexe 6 de ce mémoire est utilisé afin d'évaluer le type d'écoulement dans une branche du système. Il est à noter que le débit circulant dans une branche est considéré égal au quart du débit de circulation lorsque la PAC fonctionne en continu, soit $0,20 \text{ m}^3/\text{h}$ (le quart de $0,80 \text{ m}^3/\text{h}$). Pour un tuyau 25 mm SDR-11, on trouve un nombre de Reynolds de 512. Cela indique que le régime est laminaire et que les coefficients d'échange sont plus faibles qu'en régime turbulent ($Re > 2500$). Tel que montré plus haut, cela engendre une résistance thermique relativement élevée.

5.4.8 Évolution de la puissance à l'évaporateur

La figure 5.20 présente l'évolution de la puissance à l'évaporateur. Celle-ci est calculée à chaque minute par une moyenne glissante sur 60 minutes tel que présentée aux équations 5.1 à 5.3. La moyenne glissante permet de diminuer le bruit qui apparaît dans les résultats lorsque l'équation 5.1 est évaluée à chaque minute.

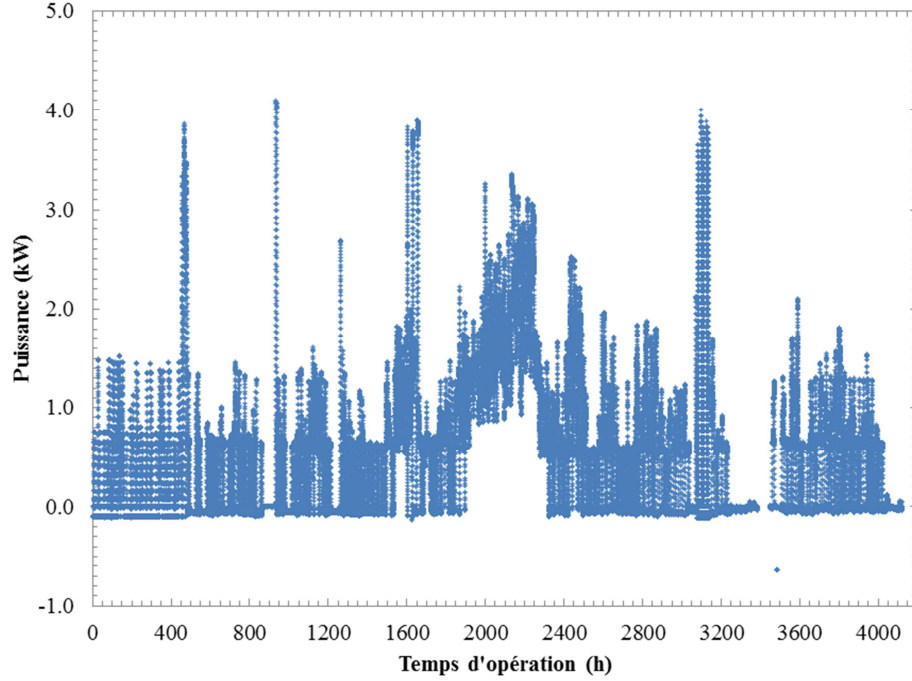


Figure 5.20 : Évolution de la puissance à l'évaporateur (moyenne glissante sur 60 minutes)

$$P_{\text{évaporateur}} = [P_{\text{condenseur}} - P_{\text{compresseur}}] \quad (5.1)$$

Où

$$P_{\text{condenseur}} = \frac{[E_{\text{Thermique}}-(i+60) - E_{\text{Thermique}}-(i)]}{[t_{i+60} - t_i]} \quad (5.2)$$

$$P_{\text{compresseur}} = \frac{[E_{\text{Électrique}}-(i+60) - E_{\text{Électrique}}-(i)]}{[t_{i+60} - t_i]} \quad (5.3)$$

En régime permanent et en négligeant les pertes dans les conduites horizontales, la puissance à l'évaporateur correspond à la puissance extraite du sol. En observant la figure 5.20, il est possible de remarquer une hausse significative de l'énergie puisée dans le sol entre environ 1900 et 2300 heures alors que la puissance à l'évaporateur n'est jamais nulle. En effet, tel que présenté à la section 5.4.1, cette période, qui correspond au mois de février, a été relativement froide et donc les besoins de chauffage ont été grands, d'où le besoin de puiser une grande quantité d'énergie dans le sol.

5.4.9 Évolution de la puissance au condenseur

La puissance au condenseur correspond à la quantité d'énergie transmise au ballon de 500 L d'eau afin de le chauffer. Il est donc possible, en comparant les besoins de chauffage et la puissance au condenseur, de déterminer si le système répond aux besoins de chauffage. La figure 5.21 présente l'évolution de la puissance au condenseur. Il est à noter qu'une moyenne glissante sur 60 minutes est utilisée pour le calcul de la puissance au condenseur.

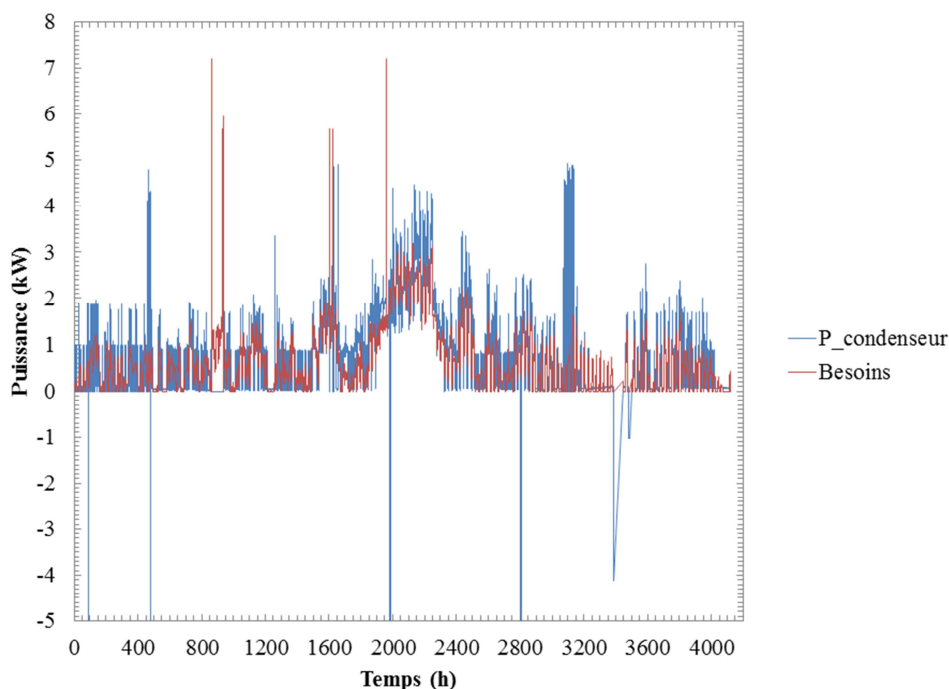


Figure 5.21 : Évolution de la puissance au condenseur (moyenne glissante sur 60 minutes) et des besoins de chauffage

Tel que présenté à la section 3.7, les besoins de chauffage sont évalués lorsque la température extérieure est inférieure à la température de non-chauffage et ils sont calculés comme suit :

$$Q = GV(T_{non-chauffage} - T_{extérieure}) \quad (5.4)$$

Où G est le coefficient de déperdition thermique volumique du BBC, soit $0,45 \text{ W/m}^3\text{K}$, V est le volume chauffé, soit 300 m^3 pour représenter une surface de 120 m^2 et $T_{non-chauffage}$ est la température de non-chauffage fixée à 12°C . Il est à noter que ces valeurs ont été fixées par EDF. De plus, afin d'observer de plus longues période de fonctionnement en continu, les besoins ont

été augmenté à partir du 7 février 2012, vers 16h00 (~ heure 2136). Pour ce faire, le volume chauffé a été augmenté de 300 à 400 m³.

En observant la figure 5.21, il est possible de remarquer quelques plages de données où les besoins calculés ou la puissance au condenseur atteignent des valeurs extrêmes, soit très basses ou très hautes. Ces valeurs semblent résulter d'un mauvais fonctionnement du système d'acquisition de données de façon ponctuelle. Les données extrêmes sont comprises dans les quatre plages suivantes : entre $t = 477,5258$ h et $478,5289$ h, $t = 1960,8278$ h et $t = 1962,8339$ h, $t = 1983,6931$ h et $t = 1984,6958$ h puis $t = 2804,4906$ h et $t = 2805,2933$ h. Ces quatre plages contiennent ensemble 178 données extrêmes retirées pour le calcul de la RMS sur un total de 256 887 données, soit 0,07% de la distribution. En observant la figure 5.21, il est possible de remarquer que la puissance au condenseur évolue de façon similaire aux besoins de chauffage pour la majorité du temps. En retirant les 178 données extrêmes et en calculant l'intégrale sous ces deux courbes, on trouve une quantité d'énergie similaire, soit 3031 kWh fournis au condenseur et 2679 kWh en besoins de chauffage. Le pourcentage d'écart entre ces deux valeurs est de 13%. Cet écart peut s'expliquer par le fait que le ballon n'est pas parfaitement isolé et qu'il a des pertes de chaleur.

5.5 Comparaison des résultats du TYPE273 et des données expérimentales

Cette section analyse la comparaison entre les données générées par le TYPE273, présenté au chapitre 2, et certaines des données expérimentales recueillies. Il est à noter que les simulations sont réalisées dans l'environnement TRNSYS. De plus, comme le TYPE273 peut simuler un maximum de deux réseaux de puits indépendants, seules les branches 3 et 4 sont modélisées. Le choix de ces deux branches repose sur le fait qu'elles ne contiennent pas les puits affectés par les problèmes de construction présentés à la section 3.6. Il est à noter que les températures d'entrée à chaque branche dans le TYPE273 sont celles provenant des mesures expérimentales à chaque pas de temps. Le choix du pas de temps à utiliser pour les simulations est d'abord discuté dans cette section. Ensuite, l'intégration du TYPE952 au modèle, permettant de calculer le transfert thermique dans les conduites horizontales, est discutée.

5.5.1 Choix du pas de temps pour les simulations

Tel que mentionné précédemment, les données expérimentales sont recueillies à chaque 10 secondes puis moyennées sur une minute par EDF. Afin de déterminer le pas de temps approprié pour simuler les 6 mois de test, les données du mois de novembre sont simulées avec un pas de temps à la minute et un pas de temps horaire. Il est à noter que le logiciel Matlab est utilisé pour exécuter un programme moyennant les valeurs à la minute sur une heure et ce pour les 6 mois de simulation. Ce fichier horaire peut ensuite être transmis en entrée à l'assemblage TRNSYS pour réaliser la simulation avec un pas de temps horaire. Les figures 5.22 et 5.23 présentent la comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs simulées par le TYPE273 pour la branche 3 (puits 9 à 12 inclusivement) avec un pas de temps à la minute et horaire respectivement pour le mois de novembre 2011.

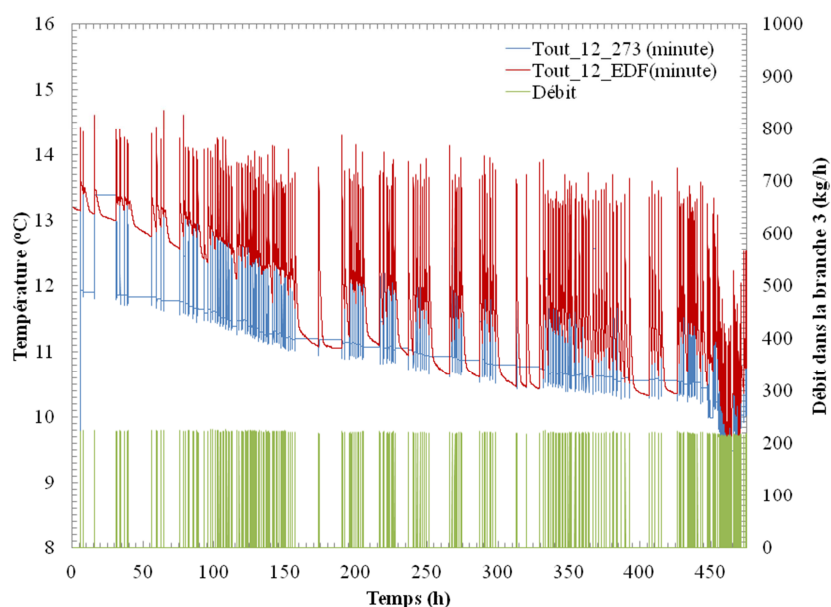


Figure 5.22 : Comparaison entre les résultats expérimentaux d'EDF et les valeurs simulées par le TYPE273 pour la branche 3 (pas de temps à la minute)

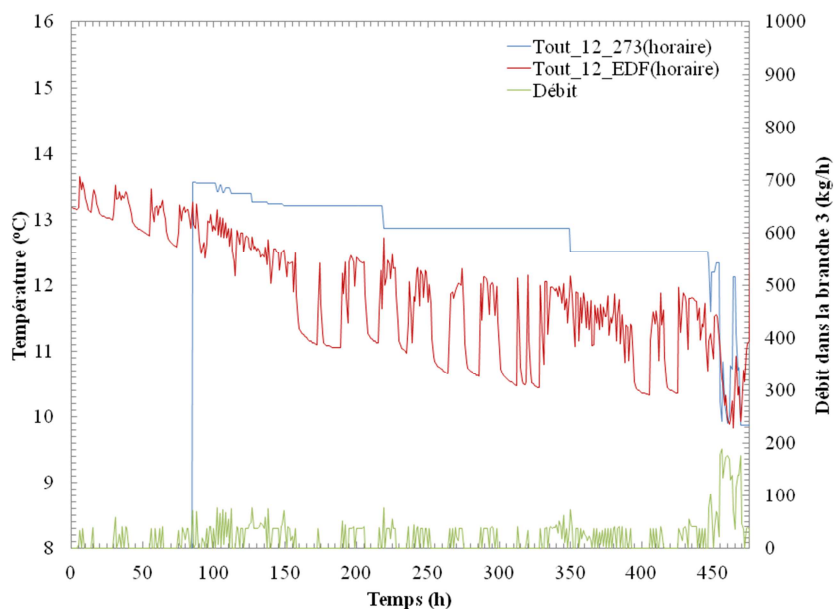


Figure 5.23: Comparaison entre les résultats expérimentaux d'EDF et les valeurs simulées par le TYPE273 pour la branche 3 (pas de temps horaire)

En analysant les données présentées dans les deux figures ci-dessus, on trouve que la moyenne, lorsque le débit est non-nul, de l'écart absolu entre la température à la sortie de la branche 3 donnée par les résultats expérimentaux (EDF) et le TYPE273 est de $1,63^{\circ}\text{C}$ pour un pas de temps à la minute et de $0,90^{\circ}\text{C}$ lorsqu'un pas de temps horaire est utilisé. Ainsi, un pas de temps horaire est utilisé dans ce qui suit. L'utilisation d'un pas de temps d'une heure permet également de diminuer le temps de calcul.

5.5.2 Intégration du TYPE952 au modèle TRNSYS

Tel que discuté au chapitre 4, le TYPE952 permet de calculer le transfert thermique dans les conduites horizontales et est donc intégré au modèle TRNSYS afin d'évaluer le transfert thermique dans les 9 mètres de conduites horizontales enterrées à 1 mètre de profondeur et reliant les 4 puits d'une même branche. Les figures 5.24 et 5.25 présentent la simulation sur la période étudiée, soit les 6 mois de la saison de chauffage 2011-2012.

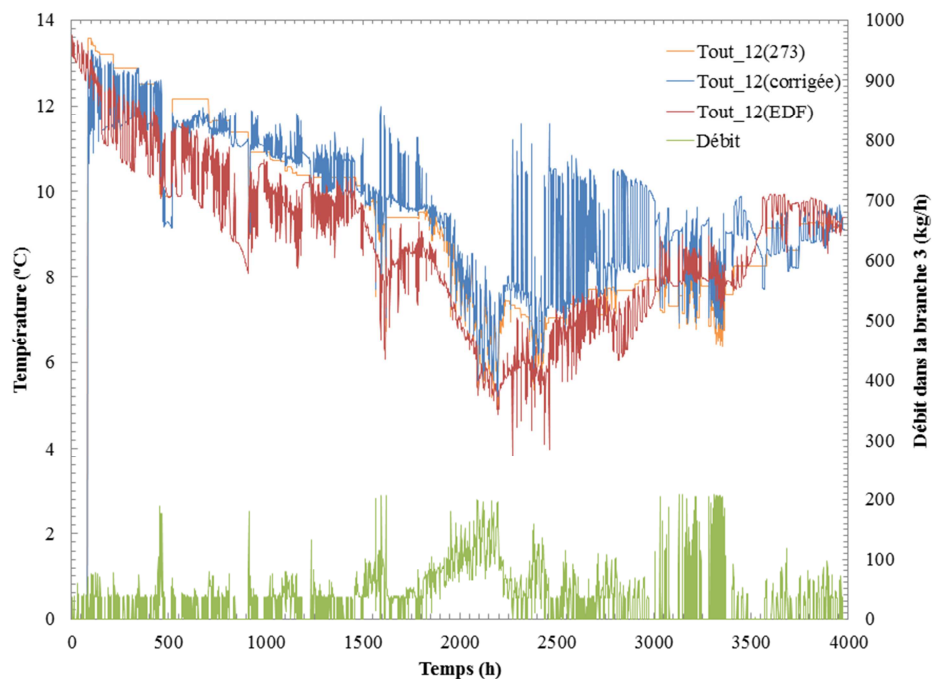


Figure 5.24: Comparaison entre les résultats expérimentaux d'EDF et les valeurs simulées par le TYPE273 pour la branche 3 incluant la correction pour conduites horizontales

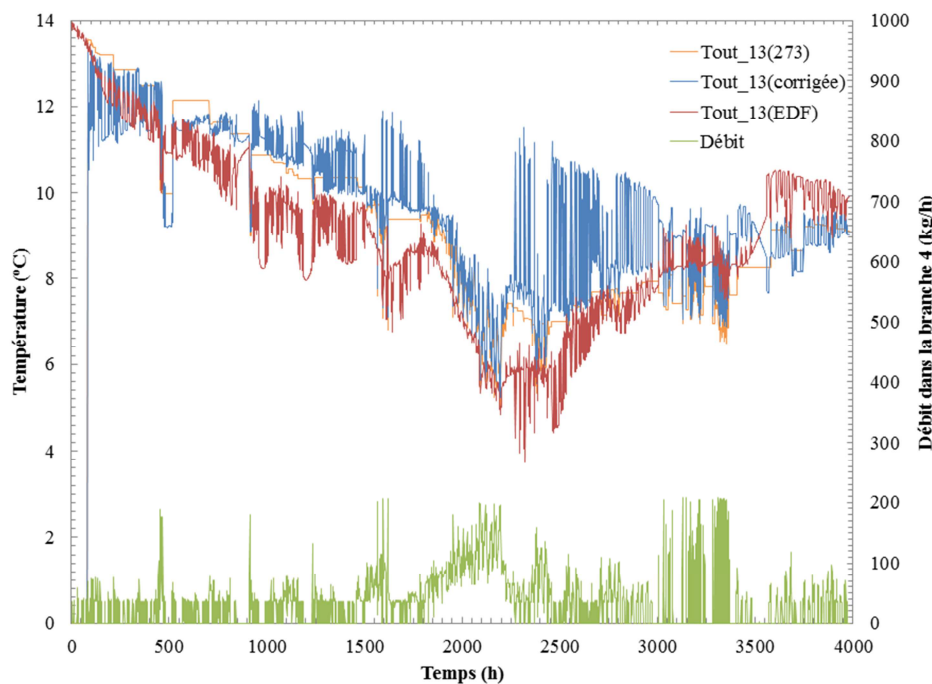


Figure 5.25 : Comparaison entre les résultats expérimentaux d'EDF et les valeurs simulées par le TYPE273 pour la branche 4 incluant la correction pour conduites horizontales

En observant les figures 5.24 et 5.25, il est possible de remarquer une tendance très similaire entre les résultats simulés pour les branches 3 et 4. Afin d'analyser la figure 5.25 en profondeur, la figure 5.26 présente un agrandissement de la figure 5.25 pour une période où les besoins en chauffage sont importants et où le système fonctionne avec un débit plus élevé pendant une plus longue période (heures 1900 à 2400).

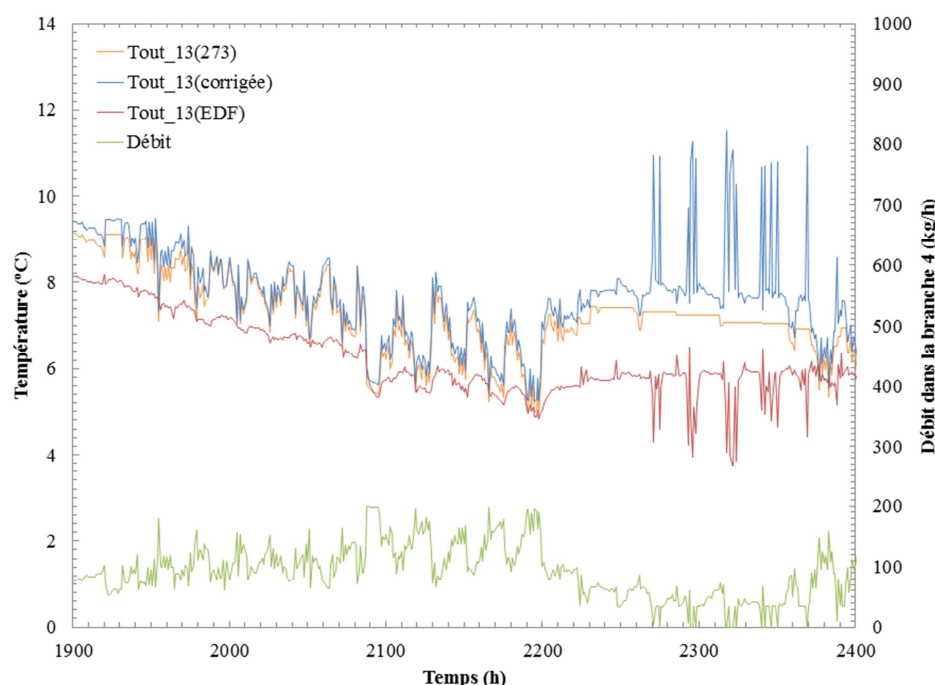


Figure 5.26 : Agrandissement de la figure 5.25 entre les heures 1900 et 2400

En observant la figure 5.26, il est possible de remarquer que le TYPE273 (Tout_13(273)) et le TYPE273 combiné au TYPE952 (Tout_13(corrigée)) se comportent similairement lorsque le débit est plus élevé, soit dans la moitié gauche de la figure 5.26. Toutefois, le TYPE273 ne se comporte pas très bien à faible débit, et donc il est difficile de recréer le fonctionnement cyclique de la pompe à chaleur. Cela est représenté par les plateaux orange s'étendant entre les heures 2200 à 2400. Les résultats de la modélisation surévaluent la température du fluide à la sortie de la branche 4 par rapport aux résultats expérimentaux. De plus, la correction pour les conduites horizontales (Tout_13(corrigée)) mène à des résultats qui présentent un plus grand écart par rapport aux données expérimentales que lorsque la correction n'est pas appliquée. Cependant, à faible débit, cette correction permet de reproduire des pics et vallées semblables à ceux retrouvés dans les résultats expérimentaux, mais avec un certain décalage. Un des problèmes majeurs

semble être attribuable à la température du fluide modélisée lorsque le débit chute drastiquement. Le TYPE273 impose une température du fluide égale à celle du pas de temps précédent lorsque le débit est inférieur à 0,018 kg/h, mais il ne s'agit peut-être pas de la meilleure solution.

La figure 5.27 présente un agrandissement des heures 2100 à 2200 de la figure 5.25 afin d'analyser davantage le comportement modélisé et expérimental.

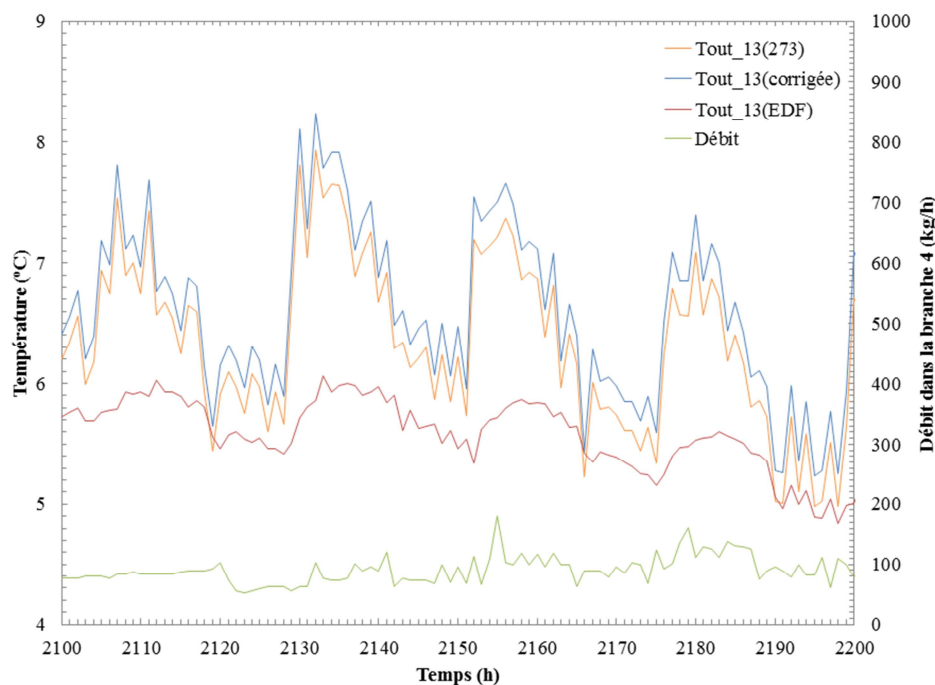


Figure 5.27 : Agrandissement de la figure 5.25 entre les heures 2100 et 2200

En observant la figure 5.27, il est possible de remarquer que pour un débit élevé continu, les résultats simulés reproduisent les oscillations des résultats d'EDF sans trop de décalage, mais présentent un écart d'un peu plus de 1°C par rapport à ceux-ci.

5.6 Résumé du chapitre

De nombreux efforts de modélisation ont été réalisés au cours de cette étude, mais force est de réaliser qu'il est nécessaire de poursuivre les travaux de recherche en ce qui concerne la modélisation des puits de faible profondeur. En effet, une portion importante du système géothermique se retrouve à proximité de la surface et donc les effets de surface ont un impact

non-négligeable sur la température du fluide. Le TYPE273 tient compte de la variation réelle de la température moyenne du sol sur la hauteur du puits, mais il serait pertinent d'intégrer le phénomène d'évapotranspiration et de couverture de neige au sol au modèle. De plus, le fonctionnement cyclique d'un tel système géothermique est problématique à modéliser avec le TYPE273 et il est nécessaire d'ajuster le comportement du modèle afin d'obtenir une meilleure réponse en régime transitoire. Finalement, l'installation expérimentale a opéré à très faible débit tout au long de la période de chauffage et cela a entraîné deux aspects rendant la modélisation difficile, soit l'opération du système en régime laminaire et un temps de résidence d'environ 8 minutes (voir Annexe 4) entre l'entrée du fluide dans une branche et la sortie de cette même branche. Ce temps de résidence n'est évidemment pas modélisé par le TYPE273. De plus, lors de périodes d'arrêt de débit, le fluide stagne un certain temps dans les conduites et adopte la température de la couche de sol où il se trouve. Il est à noter que, tel que présenté à la section 5.4.2, la température du sol entre 1 et 9 mètres de profondeur peut facilement varier de plus de 5°C. Cela n'est pas pris en compte dans le modèle, puisque c'est la température moyenne du sol sur la hauteur du puits qui est considérée à chaque pas de temps.

Somme toute, cette étude a permis d'analyser la dynamique thermique d'un champ de puits géothermique de faible profondeur au cours d'une saison de chauffage et de faire un premier pas en ce qui concerne la modélisation de tels systèmes géothermiques. Les nombreuses problématiques de modélisation relevées permettent de comprendre les capacités et limites actuelles du TYPE273 et fournissent des pistes de recherches ultérieures.

CONCLUSION

La présente étude s'est penchée sur la géothermie de faible profondeur, une alternative permettant d'utiliser des techniques de forage différentes et potentiellement moins coûteuses. L'analyse de certaines incertitudes opérationnelles liées à la construction et l'opération d'un système géothermique de faible profondeur ainsi que l'évaluation des performances énergétiques d'un tel système ont motivées cette étude.

Un site expérimental de 16 puits de 9 mètres de profondeur dont la tête est enfouie à un mètre de profondeur a été aménagé au centre de recherche d'Électricité de France (EDF) sur le site des Renardières à Moret-sur-Loing, France. Ce site est instrumenté et relié à une plate-forme Climat naturel, simulant le comportement d'un bâtiment de basse consommation énergétique.

La construction de ce site a permis de cibler certains problèmes qui devraient être adressés lors de l'aménagement d'un site de puits géothermiques de faible profondeur. En effet, afin d'assurer l'homogénéité du coulis, le remplissage devrait être fait par injection pressurisée afin d'éviter un colmatage dans le haut du puits et donc un puits principalement entouré d'air, tel que survenu pour l'un des puits de cette expérimentation. De plus, dans le cadre d'une telle étude, il serait très pertinent d'obtenir une coupe géologique pour chaque forage. En effet, le repérage des différentes couches de sol et des failles dans chaque puits permettrait de mieux saisir les phénomènes thermiques survenant dans chacun des puits.

Le test de réponse thermique réalisé diffère de l'approche classique. Le présent test a été réalisé en mode froid plutôt qu'en injectant de la chaleur dans le sol, tel que réalisé typiquement. Cela a permis d'utiliser la pompe à chaleur reliée à la plate-forme Climat naturel. Ce test réalisé sur 3 puits plutôt qu'un seul a montré qu'il est important de tenir compte du transfert thermique prenant place dans les conduites horizontales reliant ces trois puits. En appliquant la méthode graphique présentée dans les travaux de Gehlin (1998), une conductivité thermique du sol est de 2,52 W/mK et une résistance thermique équivalente du puits de 0,198 mK/W sont obtenues.

Les données expérimentales ont été collectées du mois de novembre 2011 au mois d'avril 2012, puis traitées afin de pouvoir établir une comparaison visant à valider un modèle de champ géothermique développé dans le cadre de cette étude. Le TYPE273, développé dans l'environnement de simulation TRNSYS, constitue une version modifiée du TYPE272 développé par Simon Chapuis dans ses travaux de maîtrise (Chapuis, 2009). Le TYPE273 permet de prendre

en entrée la température moyenne du sol sur la hauteur du puits à chaque pas de temps alors que le TYPE272 suppose un profil sinusoïdal de la température de l'air en surface afin de calculer le profil de température du sol selon la profondeur tel que montré à l'Annexe 1. Or, comme les puits de faibles profondeurs sont très influencés par les effets de surface, il est important de prendre en compte l'évolution réelle de la température du sol.

L'analyse des résultats expérimentaux montre que, la majorité du temps, l'installation de puits de faible profondeur parvient à répondre aux besoins de chauffage du bâtiment à basse consommation énergétique simulé par la plate-forme Climat naturel.

Cette étude a permis d'étudier de plus près la faisabilité technique de la géothermie de faible profondeur, mais il est nécessaire de poursuivre la recherche afin de déterminer si cette option est économiquement viable. En effet, la géothermie de faible profondeur permet d'éviter l'augmentation importante du coût du mètre linéaire de forage à partir d'une certaine profondeur (généralement près du roc), mais un cuvelage d'acier permettant d'éviter l'éboulement du puits dans un sol sablonneux (généralement plus près de la surface) pourrait être requis sur plusieurs puits plutôt qu'un seul. Ce cuvelage augmente le coût du mètre linéaire de forage de façon importante. Toutefois, des puits d'environ 10 mètres de profondeur peuvent être forés à l'aide de machinerie moins coûteuse à opérer que celles utilisées pour le forage des puits profonds.

De plus, il serait important de poursuivre les efforts de modélisation afin de développer un modèle plus complet prenant en compte les effets de surface influençant la performance des puits de faible profondeur ainsi que le temps de résidence du fluide dans le circuit. Parmi ces effets, la modélisation du phénomène d'évapotranspiration et de couverture de neige au sol devrait être priorisée étant donné l'impact qu'ils ont sur les premiers mètres sous la surface du sol.

Finalement, il serait intéressant de vérifier quelles sont les limites climatiques où un tel type d'installation peut être exploité ainsi que le type d'applications appropriées pour un tel système et les limites de capacité de chauffage et climatisation qui y sont associées.

RÉFÉRENCES

- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2007). *ASHRAE handbook. Applications*. Atlanta, Ga.: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- Andersland, O. B., Ladanyi, B. (Ed.). (2004). *Frozen ground engineering*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Becmeur, C. (2011). *Étude du comportement thermique d'un échangeur géothermique compact de type corbeille*. Projet de fin d'étude (baccalauréat), BRGM, Orléans.
- Bernier, M. (2000). *A Review of the Cylindrical Heat Source Method for the Design and Analysis of Vertical Ground-Coupled Heat Pump Systems*. Paper presented at the 4th International Conference on Heat Pumps in Cold Climates.
- Bernier, M. (2001). Ground Coupled Heat Pump System Simulation. *ASHRAE Transactions*, 106(1), 605-616.
- Bernier, M. (2006). Closed-loop ground-coupled heat pump systems. *ASHRAE Journal*, 48(9), 12-19.
- BetaTherm. (2012). Corbeilles géothermiques - Manuel. Retrieved 5 mai, 2012, from http://www.betatherm.de/uploads/tx_sbdownloader/HB_EWK_FR.pdf
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press.
- Cauret, O., & Bernier, M. (2009). *Experimental validation of an underground compact collector model*. Paper presented at the Effstock 2009 - Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability, Stockholm.
- Chapuis, S. (2009). *Stockage thermique saisonnier dans un champ de puits géothermiques verticaux en boucle fermée*. MSc.A, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Cimmino, M., B., M., Adams, F. . (2012). A contribution towards the determination of g-functions using the finite line source. *Accepté pour publication dans Applied Thermal Engineering*, juillet 2012.
- Cooper, L. Y. (1976). Heating of a Cylindrical Cavity, . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, 575-577.
- Cui, P., Li, X., Man, Y., & Fang, Z. (2011). Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spirral coils. *Applied Energy*, 88, 4113-4119.
- D.Bozis, K. P., N.Kyriakis. (2010). On the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles. *Energy and Buildings*, 43, 1020-1029.
- Demir, H., Koyun, A., Temir, G. (2009). Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. *Applied Thermal Engineering*, 29, 224-233.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M. (2007). Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system. *Building and Environment*, 42(3), 1126-1134.

- Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heaet Extraction Boreholes*. Doctoral Thesis, Lund Institute of Technology, Lund.
- Gehlin, S. (1998). *Thermal Response Test - In Situ Measurements of Therat Properties in Hard Rock*. Licentiate thesis, Luleå University of Tehcnology, Luleå.
- Gonzalez, R. G., Verhoef, A., Vidale, P. L., Main, B., Gan, G., & Wu, Y. (2012). Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK. *Renewable Energy*, 44, 141-153.
- Hellström, G. (1989). Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Lund: Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström, G. (1991). *Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems. I. Theory*. Ph.D., University of Lund, Lund, Sweden.
- Infoclimat. (2012). Melun - Villaroché (77) - France [91 m]. Retrieved 29 mai, 2012, from <http://www.infoclimat.fr/tableaux-station-meteo-melun-villaroché-07153-date-2006-07-05.html>
- Ingersoll, L. R., Plass, H.J. (1948). Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. *Heating, Piping & Air Conditioning*(July).
- Ingersoll, L. R., Zobel,O.,J., Ingersoll, A.C. (1954). Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications. *Madison: The University of Wisconsin Press*.
- Jalaluddin, Miyara, A., Tsubaki, K., Inoue, S., & Yoshida, K. (2011). Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. *Renewable Energy*, 36, 764-771.
- Katsura, T., Nagano, K., Narita, S., Takeda, S., Nakamura, Y., & Okamoto, A. (2008). Calculation algorithm of the temperature for pipe arrangement of multiple ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 29, 906-919.
- Kavanaugh, S. P., Rafferty, K. (1997). *Ground Source Heat Pumps - Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditionning Engineers, Inc.
- Kelvin, W. T., Larmor, J., Joule, J.P. (1882). Mathematical and physical papers. *Cambridge University Press*.
- Kim, E.-J. (2011). *Development of numerical models of Vertical Ground Heat Exchangers and Experimental Verification: Domain Decomposition and State Model Reduction Approach*. Ph.D., Centre de Thermique de Lyon (CETHIL), Lyon.
- Lamarche, L., Beauchamp, B. . (2007). A New Contribution to the Finite Line-Source Model for Geothermal Boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188-198.
- Lu Xing, J. R. C., Jeffrey D. Spitler, Piljae Im, Daniel E. Fisher. (2011). Foundation heat exchangers for residential ground source heat pump systems - Numerical modeling and experimental validation. *HVAC&R Research*, 17(6), 1059-1074.
- Lunardini, V. J. (Ed.). (1981). *Heat transfer in cold climates*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.

- Mei, V. C. (1986). Horizontal ground-coil heat exchanger theoretical and experimental analysis. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Metz, P. D. (1983). *Ground-coupled heat pump system experimental results* Paper presented at the 1983 Annual Meeting of American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Washington, DC, USA.
- Philippe, M. (2010). *Développement et validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage des bâtiments résidentiels*. Thèse de doctorat, École des mines de Paris et BRGM, Paris.
- Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D. . (2009). Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes. *Geothermics*, 38, 407-413.
- Piechowski, M. (1996). *A ground coupled heat pump system with energy storage*. Doctoral Thesis, University of Melbourne, Victoria, Australia.
- Rehau. (2012). Raugeo Helix® PE-XA sonde géothermique. Retrieved 5 mai, 2012, from http://www.rehau.com/cms/servlet/segment/FR_fr/batiment/energies_renouvelables/Geothermie/RAUGEO_Helix_PE-Xa_Sonde_geothermique/248512/raugeo_helix_pe-xa_sonde_geothermique.html
- Sheriff, F. (2007). *Generation de facteurs de reponse pour champs de puits geothermiques verticaux*. M.Sc.A, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Spitler, J. D., Cullin J. R., Bernier, M., Kummert, M., Cui, P., Liu, X., Lee, E. & Fisher, D. E. (2009). *Preliminary intermodel comparison of ground heat exchanger simulation models*. Paper presented at the 11th International Conference on Thermal Energy Storage;Effstock 2009, Stockholm, Sweden.
- Tarnawski, V. R., Leong, W.H. (1993). Computer analysis, design and simulation of horizontal ground heat exchangers. *International Journal of Energy Research* 17(467-477).
- Veillon, F. (1972). *Quelques nouvelles méthodes pour le calcul numérique de la transformé inverse de Laplace*. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Université de Grenoble, France.
- X. Duan, G. F. N. (2008). Ground Heat Transfer From a Varying Line Source With Seasonal Temperature Fluctuations. *Journal of Heat Transfer*, 130(November), 111302-111301 - 111302-111310.
- Zeng, H. Y., DIAO, N.R., FANG, Z.H. (2002). A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. *Heat Transfer-Asian Research*, 31(7), 558-567.

ANNEXE 1 – Température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits

Cette annexe présente une équation permettant de calculer la température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits. Cette équation, développée dans le mémoire de Simon Chapuis, contient une erreur et est donc développée de nouveau ici afin de montrer la correction. De plus, l'équation corrigée est validée par calcul numérique à partir de l'équation de Lunardini (1981).

La température du sol non perturbé en fonction de la profondeur z (en m) et du temps t (en jours) est donnée par Lunardini (1981) et Andersland et Ladanyi (2004) :

$$T_g(z, t) = T_0 + g \cdot z - T_1 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - n)}{t_c} - z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha}}\right) \quad (\text{A.1.1})$$

où

T_0 est la température moyenne non perturbée annuelle de la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)

g est le gradient géothermique ($^{\circ}\text{Cm}^{-1}$)

T_1 est la demi-amplitude de la variation de la température non perturbée à la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)

t_c est le temps d'un cycle, soit un an (an)

n est le nombre de jours après le 1^{er} janvier où la température non perturbée à la surface du sol est minimum (jours)

α est la diffusivité thermique du sol ($\text{m}^2\text{jour}^{-1}$)

La température moyenne du sol non perturbé sur la longueur d'un puits de hauteur H et dont la tête est enfouie à une profondeur D est obtenue en intégrant l'équation A.1.1 par rapport à la profondeur z . Les lignes qui suivent présentent ce calcul.

$$T_{g,moy}(t) = \int_{z=D}^{z=D+H} \left[T_0 + g \cdot z - T_1 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - n)}{t_c} - z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha}}\right) \right] dz$$

En posant $A = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_c}}$ et $B = \frac{2\pi(t-n)}{t_c}$, on trouve:

$$T_{g,moy}(t) = \int_{z=D}^{z=D+H} T_0 dz + \int_{z=D}^{z=D+H} g z dz - \int_{z=D}^{z=D+H} T_1 e^{-zA} \cdot \cos(B - zA) dz$$

$$T_{g,moy}(t) = T_0 z \Big|_{z=D}^{z=D+H} + \frac{g z^2}{2} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - T_1 \left[\int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \cos(B - zA) dz \right] \quad \text{Calcul auxiliaire 1}$$

Calcul auxiliaire 1:

$$I = \int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \cos(B - zA) dz$$

Intégration par parties. Posons :

$$u(z) = e^{-zA} \quad du(z) = -A e^{-zA} dz$$

$$v(z) = \frac{-\sin(B - zA)}{A} \quad dv(z) = \cos(B - zA) dz$$

$$I = \int_{z=D}^{z=D+H} u(z) dv(z) = u(z)v(z) \Big|_{z=D}^{z=D+H} - \int_{z=D}^{z=D+H} v(z) du(z)$$

$$I = e^{-zA} \cdot \frac{-\sin(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - \left[\int_{z=D}^{z=D+H} \frac{-\sin(B - zA)}{A} (-A e^{-zA}) dz \right] \quad \text{Calcul auxiliaire 2}$$

Calcul auxiliaire 2:

$$\int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \sin(B - zA) dz$$

Intégration par parties. Posons :

$$u(z) = e^{-zA} \quad du(z) = -A e^{-zA} dz$$

$$v(z) = \frac{\cos(B - zA)}{A} \quad dv(z) = \sin(B - zA) dz$$

$$\begin{aligned}
\int_{z=D}^{z=D+H} u(z)dv(z) &= u(z)v(z)\Big|_{z=D}^{z=D+H} - \int_{z=D}^{z=D+H} v(z)du(z) \\
\int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \sin(B - zA)dz &= e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - \int_{z=D}^{z=D+H} \frac{\cos(B - zA)}{A} (-Ae^{-zA})dz \\
\int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \sin(B - zA)dz &= e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} + \int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \cos(B - zA)dz \\
\int_{z=D}^{z=D+H} e^{-zA} \cdot \sin(B - zA)dz &= e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} + I
\end{aligned}$$

Calcul auxiliaire 1 (suite):

$$\begin{aligned}
I &= e^{-zA} \cdot \frac{-\sin(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - \text{Calcul auxiliaire 2} \\
I &= e^{-zA} \cdot \frac{-\sin(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - \left[e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} + I \right] \\
I &= e^{-zA} \cdot \frac{-\sin(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} - I \\
2I &= -e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA) + \sin(B - zA)}{A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} \\
I &= -e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA) + \sin(B - zA)}{2A} \Big|_{z=D}^{z=D+H}
\end{aligned}$$

Calcul de $T_{g,moy}(t)$:

$$\begin{aligned}
T_{g,moy}(t) &= T_0 H + \frac{gz^2}{2} \Big|_{z=D}^{z=D+H} + T_1 \left[e^{-zA} \cdot \frac{\cos(B - zA) + \sin(B - zA)}{2A} \Big|_{z=D}^{z=D+H} \right] \\
T_{g,moy}(t) &= T_0 + \left[\frac{gz^2}{2H} + \frac{T_1 e^{-Az}}{2AH} \cdot (\sin(B - zA) + \cos(B - zA)) \right] \Big|_{z=D}^{z=D+H}
\end{aligned}$$

$$T_{g,moy}(t) = T_0 + \left[\frac{gz^2}{2H} + \frac{T_1 e^{-Az}}{2AH} \cdot [\sin(-(Az - B)) + \cos(-(Az - B))] \right] \Bigg|_{z=D}^{z=D+H}$$

Identités trigonométriques: $\sin(-\theta) = -\sin(\theta)$ et $\cos(-\theta) = \cos(\theta)$

$$T_{g,moy}(t) = T_0 + \left[\frac{gz^2}{2H} + \frac{T_1 e^{-Az}}{2AH} \cdot [-\sin(Az - B) + \cos(Az - B)] \right] \Bigg|_{z=D}^{z=D+H}$$

$$T_{g,moy}(t) = T_0 + \left[\frac{gz^2}{2H} - \frac{T_1 e^{-Az}}{2AH} \times [\sin(Az - B) - \cos(Az - B)] \right] \Bigg|_{z=D}^{z=D+H} \quad (\text{A.1.2})$$

Il est possible de remarquer qu'un signe distingue l'équation A.1.2 ci-dessus de l'équation 4.10 du mémoire de Simon Chapuis. Il s'agit du signe négatif devant le cosinus. Cela suppose que l'équation 4.10 du mémoire de Simon Chapuis est erronée.

Afin de valider l'équation A.1.2, il est possible d'intégrer numériquement, à l'aide d'une sommation, l'équation A.1.1, tel que montré à l'équation A.1.3.

$$T_{g,moy}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{n=H/N} T_g^n(z)}{H/N} \quad (\text{A.1.3})$$

Où

$$T_g(z, t) = T_o + g \cdot z - T_1 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - n)}{t_c} - z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right)$$

$N = \text{incrément de profondeur (m)}$

La figure A.1.1 présente la température moyenne du sol non perturbé calculée selon les équations A.1.2 et A.1.3 pour une période d'un an en utilisant les paramètres du tableau A.1.1.

Tableau A.1.1: Valeurs numériques des variables

D	1 m
H	100 m
T_0	5,93°C
g	0°C/m
T_1	15,80°C
t_c	365 jours
n	20,7 jours
α	0,1 m ² /jour

En observant la figure A.1.1, il est possible de remarquer que l'équation A.1.3 suit la forme de la courbe obtenue par l'équation A.1.2. De plus, en augmentant le nombre d'incrément dans le calcul numérique, la courbe tracée à partir de l'équation A.1.3 se rapproche de la courbe tracée à partir de l'équation A.1.2. En effet, la valeur RMS est de 0,078°C lorsque des incréments de profondeur de 1 mètre sont utilisés et de 0,0024°C avec des incréments de 0,01 mètre.

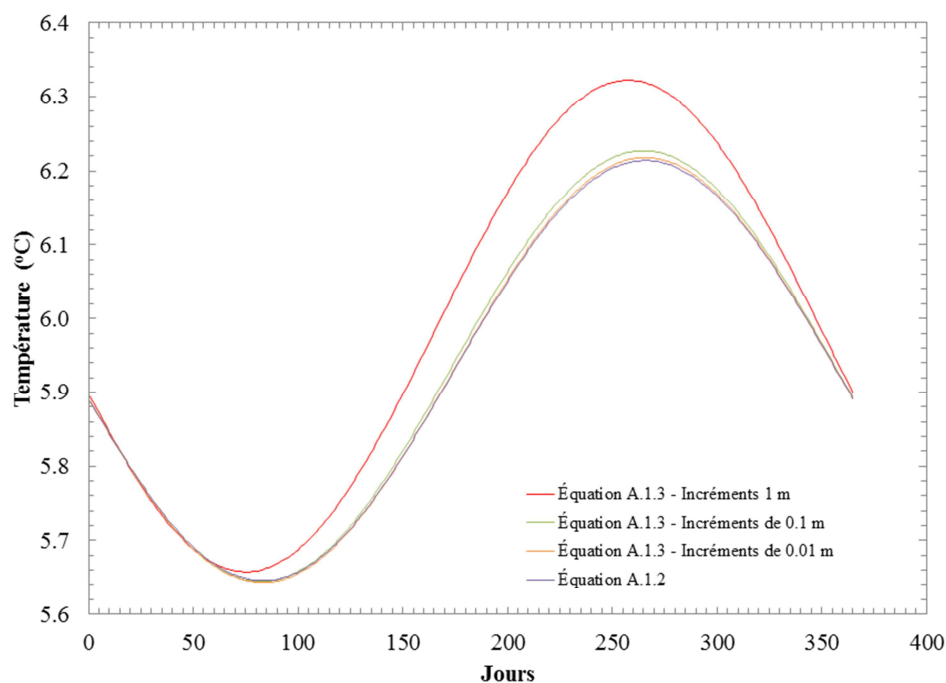


Figure A.1.1 : Température moyenne du sol non perturbé pour un puits de 100 m, dont la tête est située à $D = 1$ m, sur une période d'un an

ANNEXE 2 – Équation donnant la température de l'air à partir du fichier météo horaire de l'aéroport international Montréal-Trudeau

Cette annexe présente l'équation exprimant la température de l'air à partir du fichier météo horaire de l'aéroport international Montréal-Trudeau. Il est à noter que la température de l'air est souvent associée à la température à la surface du sol, d'où l'intérêt de connaître cette équation.

Celle-ci a été obtenue en traçant d'abord, à l'aide du logiciel EES, un graphique de la température du bulbe sec pour 365 jours. Le fichier météo duquel la température du bulbe sec a été tirée est CAN_PQ_Montreal.Intl.AP.716270_CWEC.txt, c'est-à-dire le fichier météo horaire de l'aéroport international Montréal-Trudeau.

La fonction *Curve-fit* de EES a ensuite été utilisée afin de déterminer les coefficients a_0 , a_1 et a_2 de l'équation suivante :

$$\bar{T}_{air} = a_0 - a_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24} \times (heure - a_2)\right) \quad (\text{A.2.1})$$

La figure A.2.1 présente deux courbes, soit la température extérieure horaire (bulbe sec) ainsi que l'équation obtenue par le curve-fit. Cette équation est la suivante :

$$\bar{T}_{air} = 6,33096 - 15,4073 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24} \times (heure - 497,281)\right) \quad (\text{A.2.2})$$

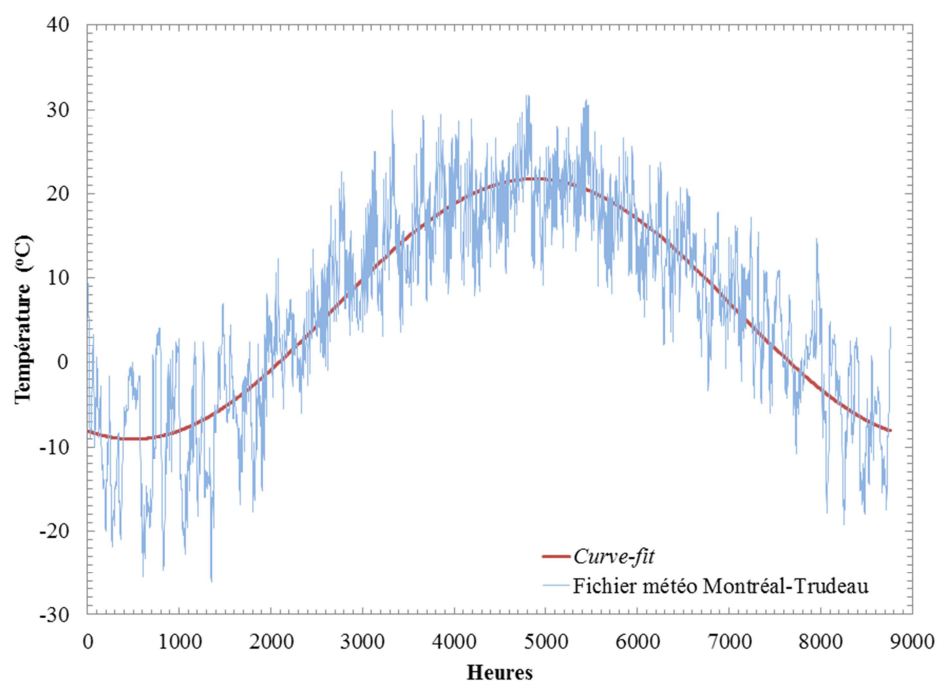


Figure A.2.1 : *Curve-fit* horaire de la température du bulbe sec pour l'aéroport international Montréal-Trudeau

ANNEXE 3 – Température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits calculée à partir de la température de l'air extérieur

Cette annexe présente une équation permettant de calculer la température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits à partir de la température de l'air extérieur. L'équation A.3.1, développée par Mikael Philippe (2010), permet de calculer la température du sol à une profondeur z , au cours d'une année, à partir de la température de l'air extérieur :

$$T_{sol}^{n-1}(z) = (T_{ext}^0 - T_0) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a \cdot \Delta t}}\right) + \sum_{k=0}^{n-2} (T_{ext}^{k+1} - T_{ext}^k) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a \cdot (n-k-1)\Delta t}}\right) + T_0 \quad (\text{A.3.1})$$

où

T_0 est la température non perturbée moyenne annuelle de la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ext}^0 est la température extérieure à l'heure 1 ($^{\circ}\text{C}$)

a est la diffusivité thermique du sol (m^2h^{-1})

Δt est le pas de temps, soit une heure dans le cas présent (h)

n est le nombre de jours après le 1^{er} janvier où la température du sol non perturbé est minimum (jours)

L'équation A.3.1 est utilisée afin de calculer la température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits. Dans un premier temps, l'équation A.3.1 est utilisée pour calculer la température, à chaque heure au cours d'une année, à une profondeur égale à $z = D$, où D est la profondeur à laquelle la tête du puits est enfouie. Ensuite, cette opération est reprise pour chaque valeur de z variant entre D et H , où H est la profondeur du puits, en choisissant l'incrément de profondeur désiré. Dans un deuxième temps, la température moyenne horaire est calculée. Pour ce faire, à chaque heure, la moyenne des températures de $z = D$ à $z = H$ inclusivement sont calculées. Par exemple, pour l'heure 1 :

$$T_{moyenne-Heure\ 1} = \frac{\sum_{n=D}^{n=H/N} T_{sol}^{Heure\ 1}(n)}{H/N} \quad (\text{A.3.2})$$

où

N est l'incrément de profondeur

Dans un troisième temps, la température moyenne quotidienne est calculée. Par exemple, pour le jour 1 :

$$T_{moyenne-Jour\ 1} = \frac{\sum_{h=1}^{h=24} T_{moyenne-Heure(h)}}{24} \quad (\text{A.3.3})$$

Connaissant maintenant la température moyenne sur la hauteur du puits à chaque jour, il est possible de comparer ces valeurs à celle générées par l'équation A.1.2.

L'intérêt de la méthode développée à partir de l'équation A.3.1 réside dans le fait que la température moyenne du sol sur la hauteur du puits est calculée à partir des valeurs horaires réelles de la température de l'air extérieur alors que l'équation A.1.2 fait appel aux valeurs de T_0 et T_1 obtenues par lissage de courbe. En effet, à partir d'un fichier donnant la température de l'air extérieur à chaque heure, un lissage de courbe est effectué afin d'obtenir une équation de la forme :

$$\bar{T}_{air} = T_0 - T_1 \times \cos \left[\frac{2\pi}{(365 \cdot 24)} \cdot (Heure - n(en\ heure)) \right] \quad (\text{A.3.4})$$

où

T_0 est la température non perturbée moyenne annuelle de la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)

T_1 est la demi-amplitude de la variation de la température du sol non perturbé ($^{\circ}\text{C}$)

n est le nombre d'heures après le 1^{er} janvier où la température du sol non perturbé est minimum (jours)

Les valeurs de T_0 et T_1 sont ensuite utilisées dans l'équation A.1.2 pour générer un profil de température non perturbée moyenne du sol sur la hauteur d'un puits.

Les figures A.3.1 et A.3.2 présentent la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes de calcul de la température moyenne du sol non perturbé sur la hauteur d'un puits, sur deux ans, pour un puits d'une profondeur de 3 m localisé à Montréal et d'une profondeur de 10 m localisé à Montsouris, Paris, respectivement.

En comparant les courbes obtenues par l'équation A.1.2 et A.3.1, il est possible de remarquer que l'écart entre celles-ci diminue lorsque la profondeur du puits augmente. En effet, la valeur RMS est de $1,17^{\circ}\text{C}$ pour $H = 3\text{ m}$ à Montréal et de $0,17^{\circ}\text{C}$ pour $H = 10\text{ m}$ à Montsouris.

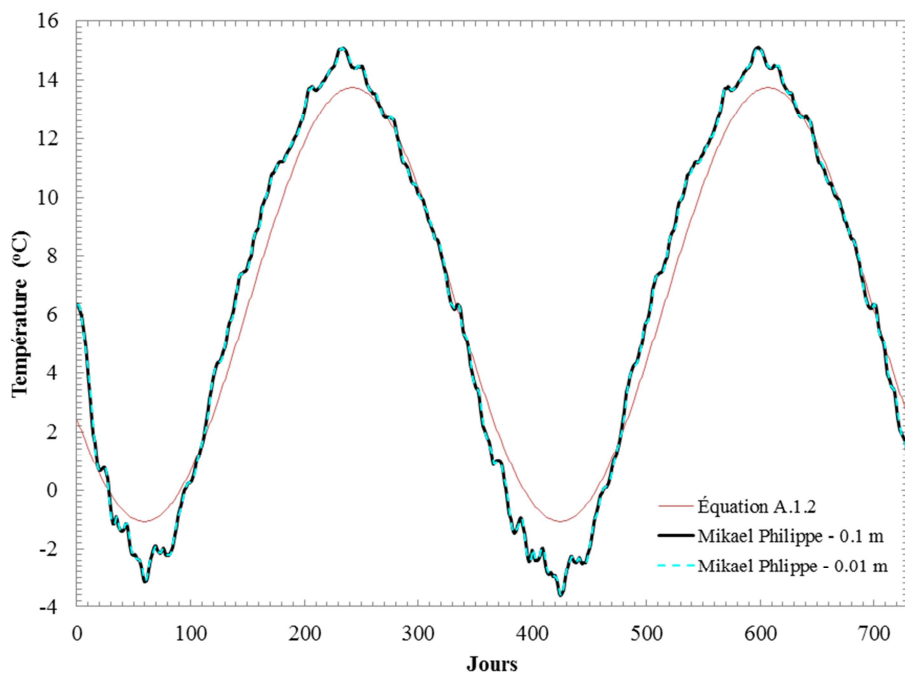


Figure A.3.1 : Comparaison de la température moyenne sur $H = 3\text{ m}$, calculée par l'équation A.3.1 et A.1.2, pour un puits de 3 m dont la tête est enfouie à 1 m de profondeur (Fichier météo: Montréal)

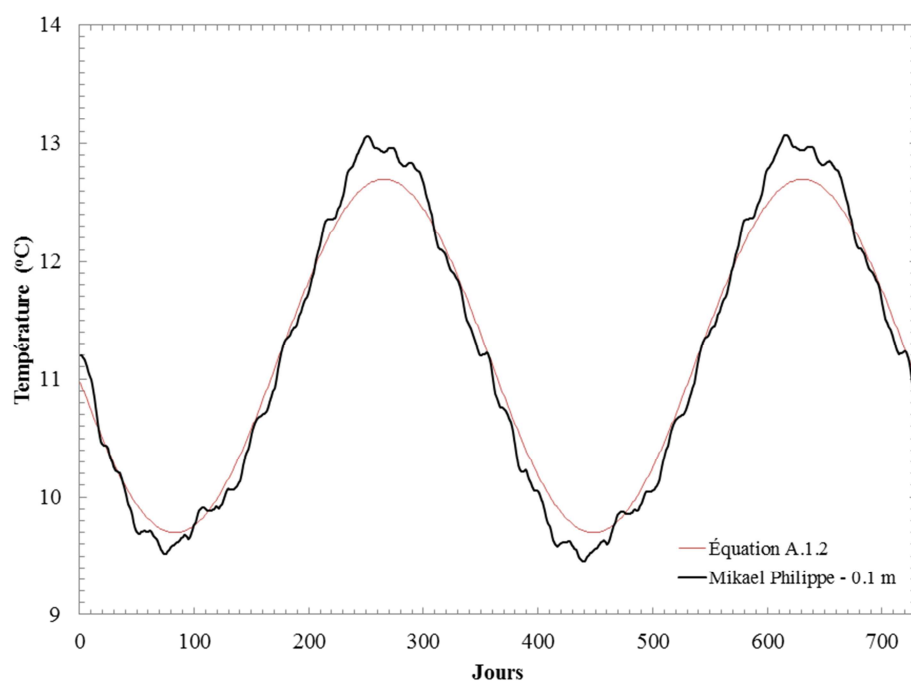


Figure A.3.2 : Comparaison de la température moyenne sur $H = 10$ m, calculée par l'équation A.3.1 et A.1.2, pour un puits de 10 m dont la tête est enfouie à 1 m de profondeur (Fichier météo: Montsouris)

ANNEXE 4 – Modélisation des sections horizontales du champ géothermique

Cette annexe présente un modèle, faisant appel à la méthode développée par Ingersoll (1948) permettant de calculer la variation de température au sein d'une section horizontale de tuyau enterré. Selon cet ouvrage, la température à la paroi d'un tube enterré peut être obtenue par :

$$T = \frac{Q'}{2\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta + T_0 = \frac{Q'}{2\pi k} I(X) + T_0 \quad \text{pour } X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (\text{A. 4. 1})$$

Les valeurs de l'intégrale $I(X)$ sont tabulées pour différentes valeurs de X à la Table 1 de la page 120 de l'article d'Ingersoll. La variable r correspond à la distance entre le point où la température est évaluée et le centre du tube, t correspond au temps écoulé depuis le début de l'opération d'absorption ou de rejet de chaleur dans le sol et T_0 représente la température moyenne du sol non perturbé. Il est à noter que le modèle créé à l'aide du logiciel EES permet entre autre d'évaluer les valeurs de $I(X)$ en fonction de r , α et t .

Puisque le tube est enterré horizontalement à une profondeur z , il est nécessaire d'effectuer une superposition spatiale. Cela consiste à calculer l'effet d'une source de chaleur au-dessus du tube enterré à une distance équivalente au double de la profondeur z . Cela représente donc une image du tube par rapport à la surface du sol. Ainsi, en mode chauffage (refroidissement du sol) le tuyau enterré a une valeur de r correspondant au rayon extérieur du tuyau et Q' est négatif (absorption de chaleur) alors que pour le tuyau image, r correspond au double de la profondeur à laquelle se trouve le tuyau enterré et Q' est positif (source).

Ensuite, la variation dans le temps des taux d'absorption de chaleur par le tuyau nécessite l'application de la superposition temporelle (M. Bernier, 2000). La figure A.4.1 (tirée de Bernier, 2000) représente schématiquement le principe de superposition appliqué à trois flux de chaleur variables.

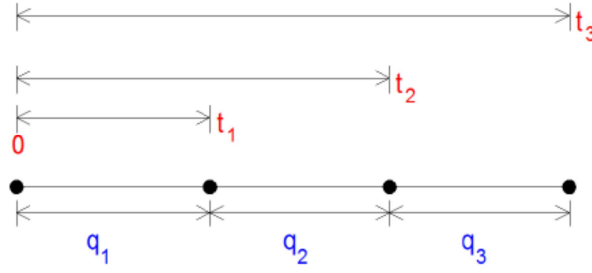


Figure A.4.1 : Représentation schématique de la superposition temporelle

Selon cette méthode, l'écart entre la température non perturbée du sol et la température à la paroi du tuyau, ΔT_g , s'exprime par l'équation A.4.2 :

$$\Delta T_g = \frac{q_1}{L} \frac{(G(Fo_{t_3-0}) - G(Fo_{t_3-t_1}))}{k_{sol}} + \frac{q_2}{L} \frac{(G(Fo_{t_3-t_1}) - G(Fo_{t_3-t_2}))}{k_{sol}} + \frac{q_3}{L} \frac{G(Fo_{t_3-t_2})}{k_{sol}} \quad (\text{A. 4. 2})$$

La superposition temporelle est développée ici à partir de la méthode de la source cylindrique infinie et fait appel à la fonction G . En effet, l'équation exprimant le transfert de chaleur (1-D) autour d'un cylindre peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (\text{A. 4. 3})$$

Carslaw et Jaeger (1959) ont proposé une solution à cette équation en utilisant les transformées de Laplace :

$$T_g - T_r = Q \frac{G(F_0, p)}{k_{sol}} \quad (\text{A. 4. 4})$$

Où F_0 est le nombre de Fourier ($F_0 = \frac{\alpha t}{r^2}$) et $p = \frac{r}{r_b}$

Dans le cas où la température à la paroi est mesurée, $p = 1$. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour calculer la fonction G . Bernier (2001), a effectué un lissage de courbe pour $p=1, 2, 5$ et 10 . C'est cette méthode qui est utilisée dans le modèle présenté. La fonction G pour $p = 1$ est donc égale à :

$$G = 10^{[-0.89129 + 0.36081 \times \log_{10}(F_0) - 0.05508 \times \log_{10}^2(F_0) + 3.59617 \times 10^{-3} \times \log_{10}^3(F_0)]} \quad (\text{A. 4. 5})$$

En ce qui concerne la superposition temporelle, le premier terme de l'équation A.4.2 illustre la contribution de q_1 sur l'ensemble de l'intervalle (t_3-0) duquel la contribution de q_1 entre t_1 et t_3 est

soustraite afin d'éviter de la considérer deux fois. Cela permet de tenir compte de la contribution du flux q_1 au-delà de son temps d'application. De la même façon, la contribution de q_2 entre t_2 et t_3 est soustraite de la contribution de q_2 entre t_3 et t_1 . Finalement, le troisième terme présente la contribution au temps présent de q_3 , soit entre t_3 et t_2 .

La superposition spatiale et temporelle permettent de déterminer la température à la paroi du tuyau. Toutefois, c'est la température moyenne du fluide à l'intérieur du tuyau enterré qui est recherchée. Celle-ci est déterminée par :

$$q_{paroi-fluide} = \frac{T_{moyenne, fluide} - T_{paroi}}{R_{tuyau} + R_{film}} \quad (\text{A. 4. 6})$$

Où

$$R_{tuyau} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_{tuyau}} \quad (\text{A. 4. 7})$$

$$R_{film} = \frac{1}{h_i 2\pi r_i} \quad (\text{A. 4. 8})$$

Sachant que

$$h_i = \frac{Nu \cdot k_{fluide}}{2r_i} \quad (\text{A. 4. 9})$$

Le nombre de Nusselt (Nu) peut être calculé de trois façons différentes selon le type d'écoulement :

Pour un écoulement laminaire ($Re < 2\,300$) la relation de Hansen est utilisée :

$$Nu = 1.86 \times \left(Re \cdot Pr \frac{2r_i}{L} \right)^{0,333} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (\text{A. 4. 10})$$

Où μ_b est la viscosité dynamique évaluée à la température moyenne du fluide et μ_w à la température de la paroi du tuyau en Pa.s. Comme la température moyenne du fluide est recherchée par le calcul, dans le cas où l'écoulement est laminaire, le ratio $\frac{\mu_b}{\mu_w}$ est estimé à 1.

Pour un écoulement transitoire ($2\,300 < Re < 10\,000$) la relation de Gnielinski est utilisée :

$$Nu = \frac{0,5f(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7\sqrt{0,5f}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}; \quad f = (1,58 \ln(Re) - 3,28)^{-2} \quad (\text{A. 4. 11})$$

Pour un écoulement turbulent ($Re > 10\,000$) la relation de Dittus-Boelter est utilisée :

$$Nu \approx 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (\text{A. 4. 12})$$

Avec $n=0,4$ en chauffage et $n=0,3$ en refroidissement.

Il est à noter que les nombre de Reynolds et de Prandtl sont calculés comme suit :

$$Re = \frac{\rho v 2r_i}{\mu} \quad (\text{A. 4. 13})$$

Où v est la vitesse moyenne du fluide dans le tuyau (m /s), μ est la viscosité dynamique du fluide (kg/(ms)) et ρ la densité du fluide (kg/m³).

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_f} \quad (\text{A. 4. 14})$$

Où C_p est la capacité thermique massique du fluide (J/kg K) et k_f est la conductivité thermique du fluide (W/mK).

Ainsi, pour une section horizontale donnée, le programme connaît au départ la température d'entrée du fluide dans la section horizontale puis procède par calculs itératifs afin de déterminer la température du fluide à la sortie de la section horizontale ainsi que le flux de chaleur correspondant.

ANNEXE 5 – Temps de résidence du fluide dans une branche de 4 puits

Le temps de résidence du fluide dans une branche de quatre puits doit être considéré lors de la comparaison entre les données expérimentales et celles prédites par le modèle. En effet, le modèle TRNFLS, implanté dans l'environnement de simulation TRNSYS, ne tient pas compte du temps de résidence du fluide dans le champ de puits géothermique. Cela s'explique par le fait que le temps de résidence du fluide dans un circuit géothermique est généralement court puisqu'il est préférable d'opérer un système géothermique en écoulement turbulent, d'où la vitesse de circulation rapide et le temps de résidence court, afin de maximiser l'efficacité du transfert thermique entre le sol et le fluide caloporteur. Toutefois, en raison de la faible profondeur du système géothermique étudié, l'écoulement est laminaire et le temps de résidence du fluide non négligeable.

La figure A.5.1. présente la position du champ de puits géothermiques par rapport à l'Algeco, bâtiment renfermant la salle de contrôle et emplacement de la pompe à chaleur. La figure A.5.2. présente une branche de quatre puits du système géothermique étudié. Le temps de résidence est calculé entre le moment où le fluide caloporteur croise la première et la dernière sonde de mesure de température intrusive d'une branche.

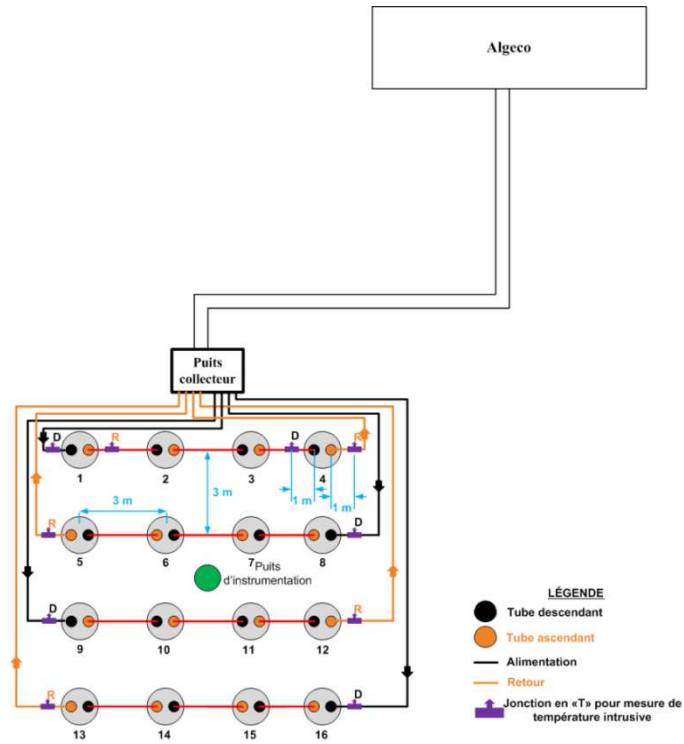


Figure A.5.1. Emplacement du champ de puits géothermiques.

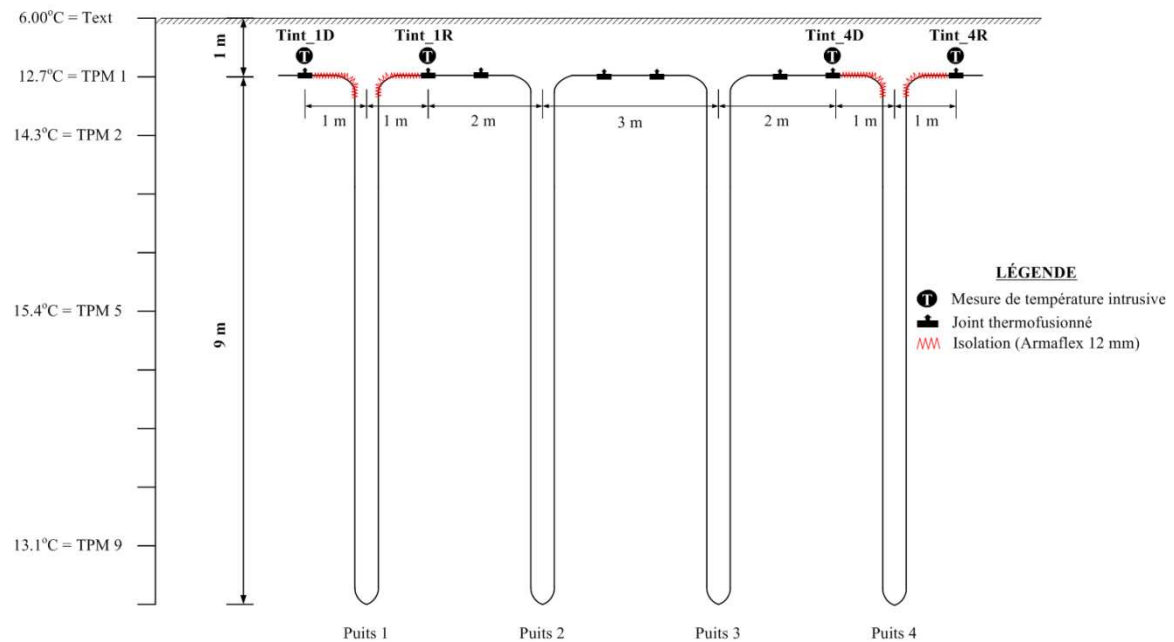


Figure A.5.2. Branche de quatre puits du système géothermique étudié

Le site expérimental possède des sondes de températures positionnées à l'intérieur du puits d'instrumentation (centre du champ géothermique) et indiquant la température à 1, 2, 5 et 9 mètres de profondeur. L'échelle de gauche de la figure A.5.2. présente ces températures en fonction de la profondeur au cours de la période étudiée un peu plus bas, soit entre 99,50 et 99,94 heures suivant la mise en opération du site expérimental.

Le calcul du temps de résidence du fluide caloporteur dans la branche 1 du champ de puits géothermiques est présenté ci-dessous :

Calcul du temps de résidence :

$$L = (9 \text{ m} \times 8) + (3 \text{ m} \times 3) + (1 \text{ m} \times 2) = 83 \text{ m} \quad (\text{A. 5. 1})$$

$$A_{\text{tuyau}} = \frac{\pi d_{\text{int}}^2}{4} = \frac{\pi (0,0204 \text{ m})^2}{4} = 3,27 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (\text{A. 5. 2})$$

$$\dot{V}_{\text{moy}} = \frac{0,86 \text{ m}^3/\text{h}}{4 \text{ branches}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 3,58 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{branche}} \quad (\text{A. 5. 3})$$

$$t_{\text{résidence}} = \frac{L \cdot A_{\text{tuyau}}}{\dot{V}_{\text{moy}}} = \frac{83 \text{ m} \cdot (3,27 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{3,58 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{branche}}} = 7,58 \text{ min} \quad (\text{A. 5. 4})$$

Un temps de résidence de 7,58 minutes, combiné à un temps d'opération du système faible, entraîne un écart significatif entre les résultats expérimentaux et ceux générés par le modèle TRNFLS. Ce phénomène est expliqué par l'exemple ci-dessous, tiré des données expérimentales du mois de novembre 2011.

En raison du mode de régulation du système et du faible besoin de chauffage dû à une température extérieure plutôt haute, le système fonctionne de façon cyclique en alternant entre de longues périodes où aucun débit ne circule et de courtes périodes où il y a circulation de fluide. En analysant de plus près ce qui se produit au redémarrage, après un long temps d'arrêt, il est possible de remarquer l'effet du décalage des températures dû au temps de résidence élevé.

Les figures A.5.3. et A.5.4. présentent deux évolutions de la température intrusive du fluide (T_{int}) dans la branche 1 avant, pendant et après le redémarrage du système, soit entre 99,50 et 99,94 h et entre 196,27 et 196,78 h suivant la mise en opération du site expérimental respectivement. Il est à noter que l'indice D représente le tuyau descendant d'un puits alors que R

représente le tuyau de retour et les indices 1 et 4 indiquent le premier et quatrième puits de la branche 1 respectivement.

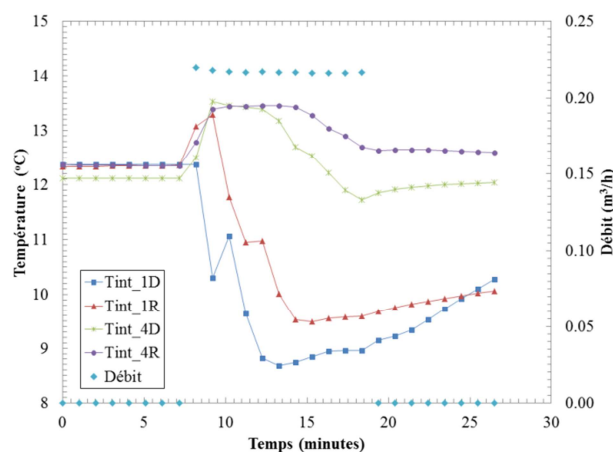


Figure A.5.3. Évolution des températures intrusives dans la branche 1 entre 99,50 et 99,94 h suivant la mise en opération du site expérimental

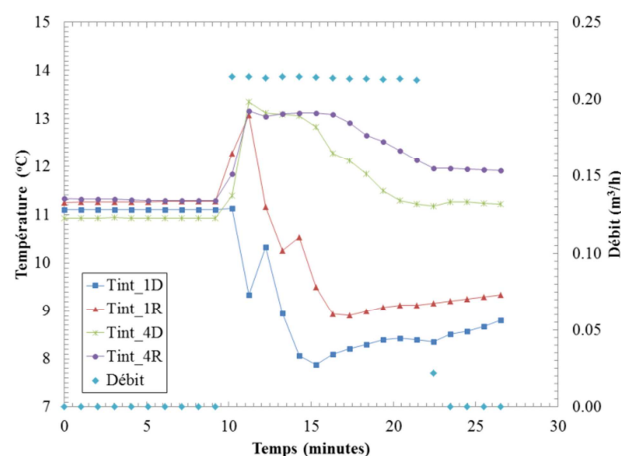


Figure A.5.4. Évolution des températures intrusives dans la branche 1 entre 196,27 et 196,78 h suivant la mise en opération du site expérimental

Il est possible de remarquer que l'allure des courbes est très similaire lors des deux séquences arrêt/redémarrage/arrêt étudiées. Il est à noter que l'analyse portera sur la figure A.5.3, sachant qu'elle s'applique également à la figure A.5.4. Dans un premier temps, lors du redémarrage, la température du fluide traversant la première sonde de température intrusive (Tint_1D) commence immédiatement à chuter. À cet instant, le fluide rencontrant la sonde Tint_1D est celui qui est stagnant dans la conduite enfouie à un mètre de profondeur depuis un certain temps. Cette chute de température est étonnante compte tenu que la température du sol à un mètre de profondeur est de 12,7°C selon la sonde positionnée dans le puits d'instrumentation.

Au même moment, le fluide stagnant depuis un certain temps dans le fond des quatre puits est lentement poussé vers le haut et croise donc les sondes Tint_1R, Tint_4D et Tint_4R. Le fluide parcourt environ 11 mètres par minute. Ainsi, au moment du démarrage de la pompe, le fluide se trouvant à 9 mètres de profondeur dans le tuyau 1D est celui qui ressort au niveau de la sonde 1R 1 minute plus tard. Comme à 9 mètres de profondeur la température du sol est à environ 13,1°C, selon la mesure donnée dans le puits d'instrumentation, cela explique une température de 13,1°C à la sonde Tint_1R.

ANNEXE 6 – Module GEOEASE permettant de calculer le nombre de Reynolds, la puissance de pompage et les pertes de charge pour une configuration donnée de site géothermique

Un module du programme GEOEASE, exploité par le logiciel Engineering Equation Solver (EES), permettant d'évaluer le nombre de Reynolds, la puissance de pompage et les pertes de charge liés à une configuration donnée de site géothermique a été développé dans le cadre de cette étude. La figure A.6.1 présente une capture d'écran de la fenêtre de l'utilisateur du module GEOEASE.

ENTRÉES

Fluide
 Fluide\$ = PG EG - Ethylène glycol
PG - Propylène glycol
EA - Ethanol
MA - Méthanol *Note: pour l'eau, choisir EG et une concentration de 0*

conc = 30 [%] Concentration en % massique

T = 9.04 [C] Température du fluide en degrés Celsius

Débit
 \dot{V} = 0.059 [L/s] Débit en L/s

Caractéristiques du tuyau
25 mm SDR-11

Caractéristique des puits
 Nb_puits = 4 [i] Nombre de puits en série
 H = 10 [m] Profondeur
 B = 3 [m] Espacement centre-à-centre entre les puits
 L1 = 12 [m] Longueur de tuyau entre la PAC et le premier puits
 L2 = 15 [m] Longueur entre le dernier puits et la PAC

Rendement de la pompe
 η_{pompe} = 0.8 η_{pompe}

Facteur de correction pour les coudes
 Facteur = 1.2 Facteur multiplicatif pour tenir compte des pertes de charge dans les coudes

Calculate

SORTIES

Pertes de charge
 $\Delta p_{par,m}$ = 63.73 [Pa/m]
 $\Delta p_{pi,100}$ = 0.6499 [ftH₂O/100ft] Pertes de charge devraient être inférieures à 3 à 4 pi/100 pi

Nombre de Reynolds
 Re = 825.1 [-] Régime turbulent recherché, ie: Re>2500

Puissance du moteur de la pompe
 $P_{e,Wat}$ = 0.65 [W] $P_{e,HP}$ = 0.00 [HP]

Débit
 USGPM = 0.94 [usgpm]

Tonnage (en supposant 3 USGPM/tonne)
 Tonnes = 0.31 [ton]
 kW = 1.10 [kW]

Critère de Kavanaugh et Rafferty - Système de pompage
 2.099 [W/ton] A-Excellent

P_t (W) / Tonnage	Critère de Kavanaugh et Rafferty
Inférieur ou égal à 50	A-Excellent
50 à 75	B-Bien
75 à 100	C-Médiocre
100 à 150	D-Pauvre
Supérieur à 150	F-Mauvais

SCHEMA

Figure A.6.1 : Capture d'écran de la fenêtre de l'utilisateur du module GEOEASE

Les valeurs à entrer sont la nature, la concentration, la température et le débit de circulation du fluide caloporteur ainsi que le type de tuyau dans lequel il circule. Ensuite, les caractéristiques géométriques du site géothermique requises sont le nombre de puits connectés en série, la profondeur des puits, l'espacement centre-à-centre des puits ainsi que la longueur de tuyau entre la PAC et le premier puits ainsi que la longueur de tuyau entre le dernier puits et la PAC.

Finalement, le rendement de la pompe ainsi qu'un facteur de correction pour tenir compte des pertes de charge dans les coudes sont requis.

Des tables de propriétés des fluides sont disponibles dans EES et sont utilisées afin de déterminer la densité et viscosité dynamique du fluide caloporteur. La section qui suit présente le système d'équations résolu par le programme.

Calcul de la vitesse du fluide :

$$A = \frac{\pi d_{int}^2}{4} \quad (\text{A.6.1})$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (\text{A.6.2})$$

où

A est la section du tuyau (m^2)

d_{int} est le diamètre intérieur du tuyau (m)

\dot{V} est le débit volumique (m^3/s)

v est la vitesse du fluide (m/s)

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{int}}{\mu} \quad (\text{A.6.3})$$

où

Re est le nombre de Reynolds (-)

ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3)

μ est la viscosité dynamique du fluide (Pa-s)

Calcul du facteur de friction de Moody :

La table de Moody est intégrée au logiciel EES et est utilisée par le programme afin de déterminer le facteur de friction de Moody. En effet, la valeur de f est obtenue en fournissant à la

fonction *moodychart* le couple $\left(Re, \frac{\varepsilon}{d_{int}}\right)$. La valeur de la rugosité (ε) utilisée pour un tuyau de HDPE est tirée d'un ouvrage de Kavanaugh et Rafferty (1997) et correspond à 0,0000212 mm.

Calcul de la perte de charge :

La perte de charge, en mètre de fluide, est calculée par la relation de Darcy-Weisbach, soit :

$$l_{f_{m\grave{e}tre}} = f \frac{L \cdot v^2}{d_{int} \cdot 2g} \quad (\text{A. 6. 4})$$

La perte de charge est également donnée en Pa, Pa/m et pi/100pi d'eau, tel que présenté aux équations A.6.5, A.6.6 et A.6.7.

$$l_{f_{Pa}} = l_{f_{m\grave{e}tre}} \cdot g \cdot \rho \quad (\text{A. 6. 5})$$

$$l_{f_{Pa/m}} = \frac{l_{f_{Pa}}}{L} \quad (\text{A. 6. 6})$$

$$l_{f_{pi/100\ pi}} = l_{f_{Pa/m}} \left(\frac{Pa}{m} \right) \cdot \frac{4,01 \times 10^{-3} po\ H_2O}{Pa} \cdot \frac{1\ pi\ H_2O}{12\ po\ H_2O} \cdot \frac{1\ m}{3,281\ pi} \cdot 100\ pi \quad (\text{A. 6. 7})$$

où

$l_{f_{m\grave{e}tre}}$ est la perte de charge (mètre de fluide)

f est le facteur de friction de Moody (-)

L est la longueur de tuyau (m)

g est la constante gravitationnelle (m/s²)

$l_{f_{Pa}}$ est la perte de charge (Pa)

$l_{f_{Pa/m}}$ est la perte de charge (Pa/m)

$l_{f_{pi/100\ pi}}$ est la perte de charge (pi/100 pi d'eau)

Calcul de la puissance transmise au fluide :

$$P_f = \frac{\dot{V} \cdot \text{Facteur} \cdot l_{f_{Pa}}}{1000} \quad (\text{A. 6. 8})$$

où

P_f est la puissance transmise au fluide (W)

\dot{V} est le débit volumique (L/s)

Facteur est le facteur multiplicatif entré par l'utilisateur et permettant de tenir compte des pertes de charge dans les coudes (-)

Il est à noter que la puissance est également convertie en HP par les tables de conversion intégrées au logiciel EES et fournie à l'utilisateur en sortie du programme.

Calcul de la puissance électrique à l'entrée du groupe moteur-pompe :

$$P_e = \frac{P_f}{\eta_{pompe}} \quad (\text{A. 6. 9})$$

où

P_e est la puissance électrique à l'entrée du groupe moteur-pompe (W ou HP)

η_{pompe} est le rendement de la pompe (-)

Recommandation de Kavanaugh et Rafferty (1997) sur la puissance de pompage :

Le critère de Kavanaugh et Rafferty est déterminé à partir du rapport entre la puissance électrique à l'entrée du groupe moteur-pompe en watts et la capacité de refroidissement installée (tonnes). Dans le programme présenté ici, on suppose une capacité de 3 usgpm/tonne.

D'abord, la capacité de refroidissement, en tonnes, est calculée par :

$$\text{Capacité}_{tonnes} = \frac{\dot{V} \text{ (usgpm)}}{3 \frac{\text{usgpm}}{\text{tonne}}} \quad (\text{A. 6. 10})$$

La capacité de refroidissement en tonnes est également convertie en kW :

$$Capacité_{kW} = Capacité_{tonnes} (tonnes) \cdot \frac{3,517 \text{ kW}}{\text{tonne}} \quad (\text{A. 6. 11})$$

Le rapport de Kavanaugh et Rafferty est calculé par :

$$Rapport = \frac{P_e (W)}{Capacité_{tonnes}} \quad (\text{A. 6. 12})$$

Le tableau A.6.1 présente les critères de Kavanaugh et Rafferty.

Tableau A.6.1 : Critères de Kavanaugh et Rafferty.

Rapport	Note
Inférieur ou égal à 50	A – Excellent
50 à 75	B – Bien
75 à 100	C – Médiocre
100 à 150	D – Pauvre
Supérieur à 150	F - Mauvais